



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL**

**MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

Por

Ricardo de Moraes Amaral

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor João Mário Burguete Botelho Cardoso

**Monte de Caparica
2008**

AGRADECIMENTOS

As minhas palavras de agradecimento relacionadas com a elaboração deste trabalho são especialmente dirigidas ao Prof. João Cardoso, pelo seu apoio e dedicação.

Agradeço também ao Eng. Alessandro Bertarelli por me ter acolhido no *Design Office* do CERN e ao Eng. Délio Duarte Ramos pelo apoio prestado. Agradeço ainda à ADI (Agência de Inovação) pela oportunidade de estágio no CERN, e ao apoio da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), que financiou o mesmo.

Como não podia deixar de ser, agradeço o apoio incondicional da minha família e amigos.

Resumo:

Este estudo pretende mostrar algumas aplicações dos métodos computacionais na actividade de projecto em Engenharia Mecânica. Apresentam-se problemas concretos de engenharia que foram abordados durante um estágio realizado no CERN – Centre Européen pour la Recherche Nucléaire, e onde foram utilizados: a) o método dos elementos finitos para cálculo de temperaturas e fluxos de calor e a sua influência sobre os deslocamentos, tensões e deformações que ocorrem numa peça; b) o método híbrido dos elementos finitos/volumes finitos para a discretização das equações de Navier-Stokes e a análise do escoamento de fluidos; c) um algoritmo genético para a obtenção da solução óptima de um problema estrutural.

O projecto em engenharia é uma actividade cada vez mais complexa, que requer o uso de ferramentas computacionais sofisticadas tais como os programas ANSYS e MATLAB que foram utilizados no estudo. A criação de modelos numéricos e a análise do seu comportamento com estas ferramentas requer simultaneamente um bom conhecimento dos princípios que estão na base do seu desenvolvimento e uma boa perícia na sua manipulação. Com elas é possível obter soluções quando os constrangimentos do projecto são exigentes e análises detalhadas do comportamento estrutural são necessárias. Neste estudo pretende-se também demonstrar que uma combinação inovadora destas ferramentas pode contribuir para obter aplicações úteis para a actividade de projecto em engenharia.

Palavras-chave: Métodos computacionais, método dos elementos finitos, algoritmos genéticos, optimização estrutural, computação paralela, comportamento elasto-plástico.

Abstract:

This thesis aims to show some applications of computational methods in the Mechanical Engineering Design activity. They are practical engineering issues that were prepared during a training conducted at CERN - Centre Européen pour la Recherche Nucléaire, and where were used: a) the finite element method to obtain the temperature distribution, the heat flux and its influence on the displacements, stresses and deformations that occur in a metal piece b) the hybrid finite-element/finite-volume approach to discretize the Navier-Stokes equations and analyse fluid flow, c) a genetic algorithm to obtain the optimal solution for a structural problem.

Design in engineering is an increasingly complex activity that requires the use of sophisticated computational tools such as the ANSYS and MATLAB programs, used in the study. The numerical modelling and analysis of model behaviour with these tools requires both a good understanding of the principles which form the basis of their development and a good skill in handling them. With these tools it is possible to get accurate solutions when the design constraints are demanding and the detailed analysis of the structural behaviour is needed. This study has also demonstrated that an innovative combination of these tools can help in getting useful applications for the engineering design activity.

Keywords: Computational methods, finite element method, genetic algorithms, structural optimization, parallel computing, elasto-plastic behavior.

SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES

AG	Algoritmo Genético
AGS	Algoritmo Genético Simples
APDL	<i>Ansys Parametric Development Language</i>
BKIN	<i>Bilinear Kinematic Hardning</i>
CCDTL	<i>Coupled Cell Drift Tube Linac</i>
CERN	<i>Centre Européen pou la Recherche Nucléaire</i>
CST	Corrosão Sob Tensão
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DTL	<i>Drift Tube Linac</i>
LINAC	<i>Linear Accelerator</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPICH	<i>Message Passing Interface Portable Implementation</i>
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
MT	Módulo Tangente
NOW	<i>Network of Workstations</i>
nTOF	<i>Neutron Time-of-flight</i>
PIMS	<i>Pi-Mode Structure</i>
RFQ	<i>Radio Frequency Quadrupole</i>
RN	Redes Neurais
SPDM	<i>Single Program, Multiple Data</i>

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJECTIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
CAPÍTULO 2 ALGORITMOS GENÉTICOS	4
2.1. ORIGEM DOS ALGORITMOS GENÉTICOS.....	4
2.2. DIFERENÇA ENTRE OS ALGORITMOS GENÉTICOS E OS MÉTODOS CLÁSSICOS.....	7
2.3. INVESTIGAÇÃO SOBRE ALGORITMOS GENÉTICOS	8
2.4. FUNCIONAMENTO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	11
2.4.1. <i>Formulação Geral de Um Problema de Optimização</i>	<i>12</i>
2.4.2. <i>Codificação das Variáveis</i>	<i>12</i>
2.4.3. <i>Avaliação do Mérito.....</i>	<i>13</i>
2.4.3.3. <i>Escala de Mérito.....</i>	<i>15</i>
2.4.4. <i>Operador Selecção.....</i>	<i>17</i>
2.4.4.1. <i>Seleção Proporcional – Método da Roleta.....</i>	<i>17</i>
2.4.4.2. <i>Seleção por torneio.....</i>	<i>18</i>
2.4.5. <i>Operador Cruzamento.....</i>	<i>19</i>
2.4.6. <i>Operador Mutação.....</i>	<i>22</i>
2.4.7. <i>Gatool – Algoritmo Genético do Matlab.....</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO	26
3.1. MODELAÇÃO EM APDL PARA OPTIMIZAÇÃO ESTRUTURAL	26
3.2. LINGUAGEM MPI.....	28
3.3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO.....	30
CAPÍTULO 4 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO.....	33
4.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	33
4.1.2. <i>Tipos de Análise de Elementos Finitos</i>	<i>34</i>
4.1.2.1. <i>Análise Dinâmica ou Estática</i>	<i>34</i>
4.1.2.2. <i>Análise Não Linear ou Linear</i>	<i>35</i>
4.1.3. <i>Modelo de material bi-linear</i>	<i>35</i>
4.2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO 1 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA ELASTO-PLÁSTICA DA JANELA DE	
NEUTRÕES DO NTOF.....	37
4.2.1. <i>Introdução.....</i>	<i>37</i>

4.2.2.	<i>Requisitos funcionais.....</i>	38
4.2.3.	<i>Propriedades do Material</i>	39
4.2.4.	<i>Modelo de Elementos finitos</i>	40
4.2.5.	<i>Resultados</i>	41
4.2.6.	<i>Conclusões</i>	47
4.3.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO 2 - SIMULAÇÃO DA BRASAGEM DO <i>RADIO FREQUENCY QUADRUPOLE (RFQ)</i>.....	48
4.3.1.	<i>Introdução</i>	49
4.3.2.	<i>Requisitos funcionais.....</i>	50
4.3.3.	<i>Propriedades do Material Para a Simulação do Processo de Aquecimento</i>	50
4.3.4.	<i>Modelo de Elementos Finitos - Simulação do processo de aquecimento</i>	51
4.3.4.1.	<i>Geometria, elementos e condições fronteira</i>	51
4.3.4.2.	<i>Resultados.....</i>	52
4.3.5.	<i>Propriedades do Material Para o Processo de Arrefecimento.....</i>	53
4.3.6.	<i>Modelo de Elementos Finitos - Simulação Para o Processo de Arrefecimento</i>	54
4.3.6.1.	<i>Geometria, elementos e condições fronteira</i>	54
4.3.6.2.	<i>Resultados.....</i>	56
4.4.	EXEMPLO DE APLICAÇÃO 3: DIMENSIONAMENTO DOS CANAIS DE ARREFECIMENTO DO <i>PI-MODE STRUCTURE (PIMS)</i>.	58
4.4.1.	<i>Cálculos analíticos.....</i>	61
4.4.1.1.	<i>Balanço térmico.....</i>	61
4.4.1.2.	<i>Coeficiente de convecção no interior do canal</i>	63
4.4.1.3.	<i>Perda de pressão</i>	65
4.4.2.	<i>Métodos computacionais em dinâmica dos fluidos.....</i>	66
4.4.3.	<i>Dados Para o Problema e Modelo de Elementos Finitos</i>	69
4.4.3.1.	<i>Propriedades do Material.....</i>	69
4.4.3.2.	<i>Geometria, Elementos e Condições Fronteira</i>	69
4.4.4.	<i>Cálculos Numéricos Pelo Método dos Elementos Finitos e Optimização Estrutural Via Algoritmo Genético.....</i>	71
4.4.5.	<i>Resultados</i>	74
4.4.5.1.	<i>Resultados do algoritmo genético</i>	74
4.4.5.2.	<i>Resultados da análise de elementos finitos</i>	74
CAPÍTULO 5	CONCLUSÕES	78
REFERÊNCIAS	79
ANEXOS	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Livros de Darwin sobre a selecção natural	5
Figura 2.2: Representação gráfica de uma função com máximos globais e locais no espaço....	7
Figura 2.3: Funções de penalização típicas: Linear e não linear	15
Figura 2.4: Escala linear em condições normais	16
Figura 2.5: Dificuldades com o uso de escala linear em gerações futuras	17
Figura 2.6: No método da roleta, a probabilidade de selecção é igual ao mérito.....	18
Figura 2.7: Cromossomas binários provenientes da selecção	19
Figura 2.8: No cruzamento são trocados os genes de um cromossoma a partir de uma posição aleatória.....	20
Figura 2.9: Cromossomas resultantes do cruzamento.	20
Figura 2.10: No cruzamento multi-ponto são trocados os genes de um cromossoma entre duas posições aleatórias.....	20
Figura 2.11: Cromossomas resultantes do cruzamento.	20
Figura 2.12: A máscara gerada aleatoriamente determina quais os genes dos cromossomas a serem trocados.....	21
Figura 2.13: Cromossomas resultantes do cruzamento uniforme.....	21
Figura 2.14: Cromossoma antes da mutação simples (primeiro cromossoma) e depois (segundo).....	23
Figura 2.15: Cromossoma antes da mutação uniforme (primeiro cromossoma) e depois (segundo).....	23
Figura 2.16: Ambiente gráfico da ferramenta de Algoritmo Genético do Matlab – gatool	23
Figura 3.1: Funcionamento do algoritmo genético em modo <i>vectorized</i>	30
Figura 3.2: Procedimento para a optimização utilizando computação paralela	32
Figura 4.1: Curva tensão-extensão do material	36
Figura 4.2: Modelo de material elasto-plástico bi-linear (BKIN)	36
Figura 4.3: Modelo de CAD do <i>Neutron Time-of-Flight</i> (nTOF)	37
Figura 4.4: Design da janela de neutrões.....	40
Figura 4.5: Superfície onde a pressão é aplicada (esquerda). Elementos com todos os graus de liberdade bloqueados na região periférica (direita).	41
Figura 4.6: Deslocamentos na janela de neutrões.....	41
Figura 4.7: Tensões resultantes da análise linear elástica.	42
Figura 4.8: Ponto de tensão máxima.	42
Figura 4.9: Modelo elasto-plástico bilinear.	43

Figura 4.37: Modelo de CAD da estrutura do PIMS.....	59
Figura 4.38: Secção do PIMS	60
Figura 4.39: Geometria dos discos	60
Figura 4.40: Variação do aumento de temperatura entre a saída e entrada de água em função da velocidade média do escoamento.	63
Figura 4.41: Malha para a simulação computacional de dinâmica dos fluidos.	67
Figura 4.42: Representação gráfica da velocidade e das linhas de corrente.....	67
Figura 4.43: Representação vectorial da velocidade.	68
Figura 4.44: Variação de pressão ao longo do canal.	68
Figura 4.45: Expansão térmica do cobre de 20 C até 70 C.	69
Figura 4.46: Geometria e malha do modelo de elementos finitos.	70
Figura 4.47: Distribuição do fluxo de calor na superfície do PIMS.....	70
Figura 4.48: Divisão da estrutura por áreas para aplicação do fluxo de calor.....	71
Figura 4.49: Parâmetros geométricos variáveis no algoritmo genético.	72
Figura 4.50: Evolução do cálculo no algoritmo genético.....	74
Figura 4.51: Distribuição de temperaturas (lado 1).....	75
Figura 4.52: Distribuição de temperaturas (lado 2).....	75
Figura 4.53: Distribuição de tensões (lado 1).....	76
Figura 4.54: Distribuição de tensões (lado 2).....	76
Figura 4.55: Expansão térmica máxima na extremidade do cone, na direcção X (50µm).	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Resumo das instruções MPI utilizadas	29
Tabela 4.1: Tensões de projecto de acordo com NF EN 13445	38
Tabela 4.2: Tensões máximas permitidas.....	38
Tabela 4.3: Propriedades do alumínio-magnésio 5083 H111.....	39
Tabela 4.4: Propriedades do Cobre UNS C10100.....	69
Tabela 4.5: Resultados do algoritmo genético.	74

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O projecto em engenharia mecânica é uma actividade cada vez mais complexa que exige o recurso a ferramentas computacionais sofisticadas. Isso acontece porque essa actividade se apoia cada vez mais na construção de modelos matemáticos de fenómenos físicos e na simulação numérica desses fenómenos.

O modelo matemático de um fenómeno físico consiste num conjunto de equações algébricas, diferenciais ou integrais que exprimem características essenciais do comportamento do sistema físico através de relações entre os vários parâmetros que caracterizam o fenómeno. Os modelos matemáticos de fenómenos físicos são muitas vezes baseados em leis fundamentais da física, tais como o princípio da conservação da massa, conservação do momento linear e conservação da energia.

A resolução dos conjuntos de equações que formam um modelo matemático depende fundamentalmente da complexidade dessas equações. Enquanto para modelos simples a resolução analítica é fácil de obter, para modelos complexos com equações diferenciais e integrais definidas em domínios de geometria complicada, a resolução analítica pode ser difícil ou mesmo impossível. Por isso, até ao aparecimento dos computadores, era comum simplificar drasticamente as equações ou os domínios, de forma a obter soluções por via analítica, por vezes extremamente conservativas e por isso mais caras.

Nas últimas décadas, contudo, a utilização de computadores veio possibilitar, com a ajuda de modelos matemáticos adequados e de métodos numéricos, resolver muitos problemas práticos de engenharia. O uso de um método numérico e de um computador para avaliar o modelo matemático de um fenómeno físico, e estimar as suas características, designa-se por simulação numérica. O método dos elementos finitos é um dos métodos numéricos mais utilizado e constitui uma ferramenta poderosa capaz de analisar problemas reais de engenharia. Com este método é possível executar simulações em vários domínios da engenharia e da física, por exemplo, envolvendo análise de tensões e deformações, determinação de frequência e amplitude de vibrações ou análise do escoamento térmico.

Outros métodos também muito usados são o método das diferenças finitas e o método dos volumes finitos.

Contudo, a essência da actividade de projecto está mais relacionada com síntese do que com análise. Perante o desenvolvimento de métodos numéricos cada vez mais poderosos, capazes de realizar análises sofisticadas de fenómenos físicos, surgiu o interesse em usar o computador para procurar soluções para o projecto e nasceu a optimização estrutural. Esta apareceu quando se juntaram métodos de simulação numérica, como o método dos elementos finitos, a algoritmos de programação matemática para conseguir realizar o dimensionamento automático de estruturas. Actualmente, para além de algoritmos de programação matemática e de algoritmos baseados em critérios de optimalidade, são muito usadas várias meta heurísticas, entre as quais se destacam os algoritmos genéticos.

Presentemente existe todo um domínio do conhecimento em expansão relacionado com o desenvolvimento de modelos matemáticos, o uso de simulações numéricas de fenómenos físicos e a aplicação de algoritmos de optimização que é designado por mecânica computacional.

1.2. Objectivos da Dissertação

Pretende-se com este trabalho demonstrar a aplicação de métodos computacionais na actividade de projecto em Engenharia Mecânica. Para isso foram escolhidos alguns exemplos de aplicação do método de elementos finitos, utilizando o programa ANSYS. Também se apresenta uma metodologia que permite o acoplamento do método dos elementos finitos com um algoritmo genético para realizar optimização estrutural.

Foram usadas duas ferramentas distintas, o programa ANSYS para realizar as análises de elementos finitos e o programa MATLAB para executar o algoritmo genético. O uso conjunto dos dois programas constitui uma ferramenta capaz de resolver problemas práticos de optimização estrutural requerendo simulações numéricas sofisticadas pois a metodologia empregue permite aceder a todas as capacidades de simulação que o programa ANSYS disponibiliza. Por outro lado o seu uso necessita de reduzidos conhecimentos de programação em linguagem MATLAB, pois este programa já disponibiliza um algoritmo genético pronto a usar. Contudo, isto não representa uma limitação pois este algoritmo pode ser modificado sempre que se considere necessário visto estar integrado no ambiente de desenvolvimento MATLAB que se caracteriza por uma grande versatilidade.

Um dos inconvenientes do uso de algoritmos genéticos em otimização estrutural é o excessivo tempo de cálculo que estes algoritmos requerem, principalmente quando estão envolvidas análises de elementos finitos. Por isso procurou-se adicionar a esta metodologia a capacidade de aproveitar a existência de vários computadores ligados em rede utilizando processamento paralelo. Para tal foi criado um programa de interface usando a linguagem FORTRAN com instruções MPI, que permite distribuir por vários computadores a tarefa de realizar as várias análises de elementos finitos necessárias para cada geração do algoritmo genético.

1.3. Organização da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos Introdução, Algoritmos Genéticos, Metodologia de Otimização, Exemplos de Aplicação e Conclusões.

A Introdução apresenta os objectivos e motivações para a execução desta dissertação, bem como a sua organização. No capítulo sobre Algoritmos Genéticos é apresentada a teoria dos algoritmos genéticos e explicado o seu funcionamento, e no capítulo Metodologia de Otimização é descrita a metodologia usada para o acoplamento entre os programas ANSYS e MATLAB e o procedimento para executar o programa ANSYS em vários computadores em paralelo.

O capítulo Exemplos de Aplicação, pretende demonstrar a aplicação destas ferramentas em problemas de engenharia reais. São apresentados dois exemplos de estruturas analisadas pelo método dos elementos finitos e é otimizada a disposição e os parâmetros do escoamento (temperatura e velocidade do fluido) de um canal de arrefecimento usando a metodologia desenvolvida. As Conclusões pretendem resumir o que de mais importante se observou nos trabalhos efectuados e apresentar perspectivas de futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

ALGORITMOS GENÉTICOS

Esta dissertação pretende mostrar alguns exemplos de aplicação de métodos computacionais em engenharia mecânica. Os exemplos utilizam o método dos elementos finitos aplicado à resolução de problemas de mecânica dos sólidos e de mecânica dos fluidos, e os algoritmos genéticos aplicados à optimização estrutural. Considerou-se que a diversidade das metodologias empregues aconselhava uma delimitação precisa do tema a tratar no capítulo inicial dedicado a apresentar os princípios teóricos do estudo realizado. Assim, porque a contribuição mais significativa deste estudo consiste na metodologia desenvolvida para a interligação entre os programas ANSYS e MATLAB com o objectivo de realizar optimização estrutural, optou-se por circunscrever os princípios teóricos apresentados neste capítulo ao âmbito dos algoritmos genéticos.

2.1. Origem dos Algoritmos Genéticos

Há muito tempo que a natureza serve de inspiração ao homem para a criação de máquinas, métodos e técnicas que melhorem a vida quotidiana. Algumas invenções notáveis como os aviões, baseados nas características dos pássaros, e os submarinos, com sistemas de imersão semelhantes aos dos peixes, são disso exemplo evidente.

Os algoritmos genéticos (AG's) são uma família de modelos computacionais inspirados na evolução natural defendida por Charles Darwin (1859) e são utilizados para encontrar soluções aproximadas de problemas de optimização.

Em 1859, Darwin publicou *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*, Darwin (1859) e em 1871 *The Descent of Man, and Selection in Relation to Sex*, Darwin (1871). Nestes livros defendia que o homem, assim como os outros seres vivos, eram resultado da evolução natural.

Nos seus estudos, concluiu que nem todos os organismos que nascem, conseguem sobreviver ou reproduzir-se. Os indivíduos mais propensos à sobrevivência são aqueles mais adaptados para enfrentar as condições ambientais. Estes indivíduos tem uma maior probabilidade de se

reproduzir e assim deixar descendentes. Com o passar dos anos, as adaptações favoráveis ao ambiente tendem a permanecer e as desfavoráveis tendem a desaparecer.

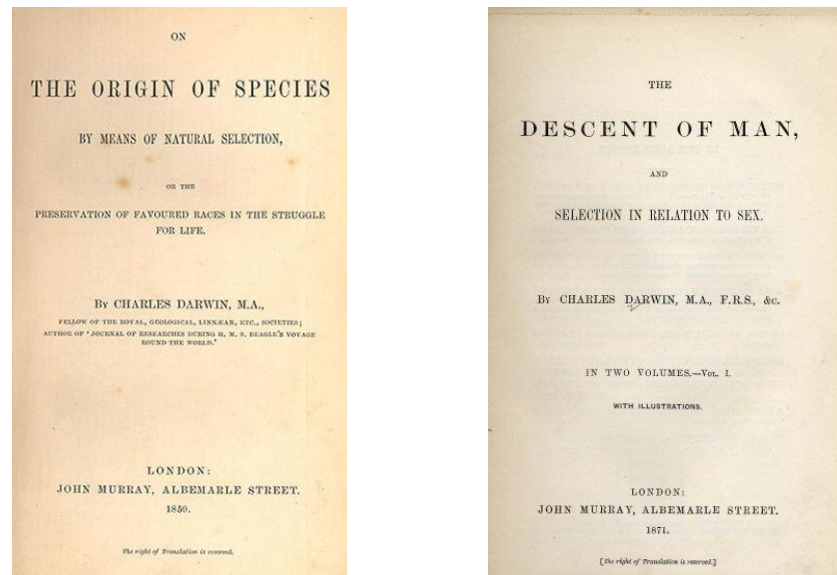


Figura 2.1: Livros de Darwin sobre a selecção natural

As teorias de Darwin foram a motivação para a construção de modelos computacionais. Os trabalhos de investigação desenvolvidos por John Holland e os seus alunos na área da genética e sistemas adaptativos na Universidade do Michigan são considerados pioneiros e deram origem a uma extensa investigação no domínio dos AG's. Os estudos que empreendeu tinham dois objectivos: (1) explicar rigorosamente os processos adaptativos dos sistemas naturais, e (2) desenvolver um modelo computacional que reproduzisse os mecanismos importantes desses sistemas naturais. Em 1975, Holland publicou *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Holland (1975). A teoria foi desenvolvendo-se e na década de 80 David Goldberg, aluno de Holland, obteve as primeiras aplicações com sucesso industrial. Em 1989, Goldberg publica *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Goldberg (1989). Desde então os algoritmos genéticos têm sido aplicados com sucesso nos mais diversos problemas de optimização.

Os AG's modelam uma solução para um problema específico numa estrutura de dados como a de um cromossoma e, com o uso de operadores genéticos inspirados na biologia evolutiva e na hereditariedade, como a mutação, a selecção e o cruzamento, efectuam uma pesquisa paralela e estruturada ainda que maioritariamente aleatória. Apesar de terem uma base aleatória, não são uma pesquisa simples ao acaso, os AG's são determinísticos. Baseiam-se

em dados determinísticos provenientes de indivíduos, de anteriores gerações, para encontrarem indivíduos com “melhor aptidão”.

O seu funcionamento assegura que nenhum ponto do espaço de solução tem a probabilidade zero de ser analisado. Os operadores genéticos são aplicados a uma população de indivíduos, que pode variar de acordo com o problema optimização a resolver. Os indivíduos com melhor aptidão terão maior probabilidade de conseguir gerar outros indivíduos para a próxima geração.

Os AG's operam numa população de indivíduos, cada um deles representando uma possível solução, que está codificada num cromossoma. Cada cromossoma é constituído por um conjunto de genes que representam em numeração binária os valores das variáveis do problema. A aptidão de cada cromossoma é a medida do mérito dessa solução definida a partir dos valores da função objectivo e dos constrangimentos.

Os AG's consistem basicamente na sucessiva aplicação de três processos: (1) codificação e decodificação das variáveis do problema utilizando cromossomas, (2) avaliação da aptidão de cada cromossoma, e (3) aplicação dos operadores genéticos para gerar a próxima geração de soluções. A aptidão de cada cromossoma é avaliada através do cálculo da sua função objectivo. Se a solução violar os constrangimentos, o valor da função objectivo é penalizada.

A maioria dos algoritmos genéticos são variações do algoritmo genético simples (AGS) proposto por Goldberg (1989). O AGS de Goldberg consiste em três operadores genéticos básicos: selecção, cruzamento e mutação. A operação de selecção no AGS utiliza o método da roleta. A operação de cruzamento usa a técnica do ponto único, e a operação de mutação efectua uma mutação uniforme. O funcionamento destes operadores é explicado na Secção 2.4.

O objectivo do processo de selecção é permitir que a informação armazenada nos cromossomas com bons valores de aptidão sobreviva na geração seguinte. Tipicamente, a cada cromossoma da população é atribuída uma probabilidade de ser seleccionado como cromossoma progenitor baseada na aptidão desse mesmo cromossoma. As gerações seguintes são desenvolvidas a partir da selecção de cromossomas progenitores e a aplicação de outros operadores como o cruzamento e a mutação.

O cruzamento é um procedimento através do qual um cromossoma progenitor é partido em segmentos e alguns desses segmentos são trocados com os segmentos correspondentes de outro cromossoma progenitor. O cruzamento de ponto único introduzido pelo AGS de Goldberg parte cada um dos cromossomas progenitores em dois segmentos e troca os segundos segmentos para criar novos cromossomas.

A mutação permite a possibilidade de criar características que não existem nos progenitores e pode ser benéfica na prevenção da convergência prematura e na introdução de diversidade na população. Sem um operador deste tipo, algumas possíveis regiões importantes do espaço do problema poderiam nunca ser exploradas.

2.2. Diferença entre os Algoritmos Genéticos e os Métodos Clássicos

Durante as últimas três décadas, foram desenvolvidos muitos métodos de programação matemática para a resolução de problemas de optimização. Embora, não tenha sido encontrado um único método inteiramente eficiente e robusto para a vasta gama de problemas de optimização em engenharia, a maior parte dos métodos envolve a selecção de valores para determinadas variáveis que melhoram o comportamento e a performance de um problema em particular enquanto obedecem aos requerimentos e especificações de projecto. A maioria dos métodos de programação matemática considera variáveis contínuas. Contudo muitos problemas reais de optimização estrutural envolvem variáveis discretas. Nos problemas de optimização discretos, a procura de óptimos globais ou locais torna-se uma tarefa mais difícil. Nos problemas contínuos, para encontrar o óptimo basta subir a função na direcção de maior inclinação. Se o ponto inicial se encontrar perto de um óptimo local pode originar situações em que o óptimo global não seja encontrado (figura 2.2).

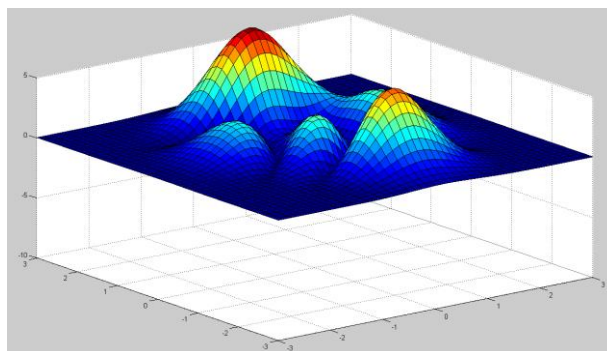


Figura 2.2: Representação gráfica de uma função com máximos globais e locais no espaço de solução.

As técnicas de pesquisa usadas em programação matemática iniciam-se com um único candidato que, iterativamente, é manipulado utilizando um algoritmo de pesquisa. Estes métodos são eficientes pois necessitam de um número reduzido de cálculos da função a otimizar e dos constrangimentos. Contudo não são robustos pois podem não convergir quando existem óptimos locais no problema. Por outro lado requerem a continuidade do espaço de soluções, pois necessitam de calcular as derivadas da função a otimizar e dos constrangimentos. São por isso adequados quando as variáveis do problema são contínuas mas não quando assumem valores discretos.

Os AG's diferem dos métodos tradicionais de procura e optimização, principalmente em quatro aspectos:

1. Trabalham com uma codificação do conjunto de parâmetros e não com os próprios parâmetros;
2. Trabalham com uma população representando um conjunto de pontos e não com um único ponto;
3. Utilizam apenas informações de custo ou mérito e não derivadas ou outro conhecimento auxiliar;
4. Utilizam regras de transição probabilísticas e não determinísticas.

Os AG's são robustos e de fácil aplicação a um grande conjunto de domínios. Não exigem continuidade das variáveis de projecto, sendo pois adequados para problemas de optimização discreta. A sua principal desvantagem reside no grande volume de cálculo requerido, mas o aparecimento de computadores cada vez mais potentes tende a reduzir a importância desta limitação.

2.3. Investigação sobre Algoritmos Genéticos

Durante os últimos anos, os AG's foram usados para resolver uma variedade de problemas de engenharia. O objectivo desta secção é descrever brevemente a evolução dos AG's ao longo dos anos, demonstrando alguns dos exemplos onde os AG's foram aplicados e, referenciando alguns autores.

A primeira contribuição para a otimização estrutural foi o trabalho de Goldberg e Samtani (1986). Eles discutiram o projecto óptimo de uma estrutura em treliça com 10 barras. Mais tarde, Hajela e Lee (1993a), Hajela e Lee (1993b), e Hajela e Lee (1995) utilizaram os AG's para a otimização topológica de estruturas em grelha. Utilizaram um processo de otimização em dois passos: (1) primeiro usaram requerimentos de estabilidade cinética para identificar configurações topológicas estáveis, e (2) consideraram adição/remoção de membros e redimensionamento.

Ramasamy e Rajasekaran (1996) projectaram sistemas em treliça com condições de carga múltiplas utilizando um AG e redes neuronais (RN). Redes neuronais, são sistemas computacionais baseados numa aproximação à computação baseada em ligações. Nós simples (ou "neurónios") são interligados para formar uma rede de nós - daí o termo "rede neuronal". A combinação das RN com AGs foi um avanço importante para cada um deles. Os algoritmos genéticos podem ser utilizados para treinar as RNs e estas, por sua vez podem eliminar dois problemas comuns nos algoritmos genéticos: Convergência lenta e perda de genes bons devido à aplicação dos operadores genéticos.

Cheng e Li (1997 e 1998) desenvolveram uma metodologia de optimização multi-objectivo constrangida, combinando um AG de Pareto com uma função de penalização difusa. O AG de Pareto consiste em 5 operadores básicos: reprodução, cruzamento, mutação, nicho, e filtro de Pareto. O operador nicho teve origem do conceito de Cavicchio (Cavicchio, 1972) onde as soluções dos filhos substituem as soluções dos pais apenas quando obtêm um melhor desempenho que estes. Como efeito, as soluções dos filhos eram apenas produzidas nas redondezas das soluções paternas ou em posição não dominadas pelas antigas. Na reprodução evolucionária, os melhores traços dos pais são passados para a geração seguinte, mas alguma da informação perdida dos pais pode ser pontos óptimos. O filtro de Pareto armazena as soluções não dominantes que vão aparecendo ao longo do processo evolutivo e elimina os pontos dominantes. Assim, as soluções de um AG de Pareto são desenvolvidas pelo processo evolutivo completo e não apenas através da última geração. Os resultados de vários problemas de optimização multi-objectivo envolvendo estruturas em treliça indicaram que o AG de Pareto lidava com superfícies de resposta complicadas e encontrava o óptimo global mais frequentemente que o método de busca clássico.

Nair et al. (1998) desenvolveu um método que combina modelos de aproximação com um procedimento baseado em AG's. O objectivo era usar informação empírica para convergência

assintótica para o óptimo utilizando um número limitado de análises exactas. O procedimento resultante foi colocado como um problema de optimização dinâmico com uma função objectivo variável e um mecanismo que selecciona pontos onde as análises exactas devem ser executadas. Adicionalmente, um operador de selecção adaptativo foi desenvolvido para procurar eficientemente no espaço de procura complexo. Os resultados apresentados para uma treliça de 10 barras indicaram que o número de análises exactas, necessárias para determinar o óptimo, pode ser reduzido em mais de 97% do problema original.

Cardoso, Coelho e Almeida (2002) utilizaram AG em problemas com vários óptimos locais e globais considerando a existência de subpopulações. Inicialmente, geraram uma partição do domínio em regiões resultantes da divisão do intervalo de variação de cada variável de projecto em partes iguais. Cada subpopulação é formada pelos indivíduos agrupados numa região. Para se conseguir que a optimização seja eficiente com este tipo de agrupamento, torna-se necessário introduzir duas técnicas auxiliares. Por um lado, as subpopulações associadas às regiões promissoras do domínio são gradualmente enriquecidas, enquanto outras menos promissoras são eliminadas. Por outro lado, o algoritmo modifica a partição do domínio de acordo com as características do problema que se pretende resolver. A evolução ao longo de sucessivas gerações das várias subpopulações é feita em paralelo, restringindo-se a selecção e cruzamento a indivíduos da mesma subpopulação. Quanto ao operador mutação, o algoritmo utiliza uma probabilidade de mutação variável e define um *raio de mutação* que restringe a amplitude dos movimentos de um indivíduo no domínio de pesquisa. Esta restrição de movimentos procura preservar os vários nichos que se vão formando.

Takahama et al. (2004) introduziram o conceito de degeneração num AG. Degeneração é o declínio evolucionário ou perda de uma função ou característica. Assume-se que genes deteriorados e mutações irreversíveis causam degeneração e se esta ocorrer, algumas características de um indivíduo são perdidas. Se as características forem guardadas como parâmetros do modelo, o número de parâmetros pode ser reduzido e a estrutura de parâmetros óptima é descoberta.

Kicinger et al. (2005) descrevem o estado da arte da computação evolucionária no projecto estrutural. Neste artigo apresentam os desenvolvimentos mais recentes até a data. O campo de projecto evolucionário é introduzido e a sua importância no projecto estrutural é explicado, assim como os métodos de como lidar com os constrangimentos de projecto impostos. A optimização multiobjectivo em rápido crescimento é descrita e um subcampo emergente do

projecto coevolucionário é subsequentemente introduzido e os seus desenvolvimentos recentes são apresentados.

Samad e Kim (2008) optimizaram as pás de um compressor axial utilizando um algoritmo genético multi-objectivo. Neste estudo, a pressão total e a eficiência adiabática foram utilizadas como funções objectivo. As equações de Navier-Stokes são resolvidas para obter a função objectivo e o campo de escoamento dentro compressor. As variáveis de projecto seleccionadas foram a inclinação e espessura das pás através da formulação polinomial de Bezier. Com esta optimização, a eficiência máxima e a pressão total aumentaram 1.76 e 0.41 por cento respectivamente.

2.4. Funcionamento do Algoritmo Genético

Para explicar porque é que operadores como selecção, o cruzamento, e a mutação podem dotar os algoritmos genéticos com um poder de busca robusto, Holland (1975) propôs um modelo chamado *schema theorem*, ou teorema dos esquemas que é o teorema fundamental dos algoritmos genéticos. Este teorema diz que pequenos esquemas (agrupamentos de genes, também chamados blocos de construção) contidos em bons cromossomas aumentam exponencialmente nas gerações seguintes, ao passo que esquemas contidos em cromossomas maus tendem a desaparecer nas gerações seguintes (Goldberg, 1989). Este teorema pode ser expresso pela equação seguinte:

$$m(H, t + 1) \geq m(H, t) \times \frac{f(H)}{f_{avg}} \left[1 - p_c \frac{\delta(H)}{L-1} - O(H)p_m \right] \quad (2.1)$$

onde $m(H, t+1)$ e $m(H, t)$ são o número de esquemas H na geração $t+1$ e t , respectivamente, $f(H)$ é o valor médio da função objectivo dos cromossomas que incluem o esquema H , f_{avg} é o valor médio da função objectivo de toda a população, $\delta(H)$ é o comprimento do esquema H , L é o comprimento total do cromossoma. $O(H)$ é a ordem do esquema H , e p_c e p_m são as probabilidades de cruzamento e mutação, respectivamente.

2.4.1. Formulação Geral de Um Problema de Optimização

O critério de optimização mais usado no projecto de estruturas é o custo. Tipicamente, o custo é uma função do peso total de uma estrutura. Outros factores que podem estar envolvidos na estimação do custo da estrutura incluem a manutenção e custos de conexão.

Tipicamente, um problema de optimização estrutural sujeito a restrições é caracterizado pela seguinte formulação:

Encontrar $x^ \in D$ que*

Minimiza a função $f(x)$ sujeita a:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, p$$

$$u_i \leq x_i \leq v_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Onde x é o vector das n variáveis de projecto $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $f(x)$ é a função objectivo e $g_j(x)$ os p constrangimentos do problema. O domínio D é definido pelos limites inferiores, u_i , e superiores, v_i , do intervalo de variação de cada variável de projecto x_i :

$$f(x): D \rightarrow R, \quad D \subset R^n \quad (2.2)$$

$$D = \{x \in R^n / u_i \leq x_i \leq v_i, i = 1, \dots, n\} \quad (2.3)$$

Esta formulação pode ser generalizada aos problemas em que se pretenda obter o máximo de uma função. Nesses casos basta considerar que a função objectivo é igual à função a maximizar multiplicada por -1.

Tradicionalmente os AG's resolvem problemas de maximização do mérito. Por isso é necessário atribuir valores mais elevados de mérito aos cromossomas que correspondam a valores mais baixos da função objectivo. Isso é explicado na secção que descreve o avaliação do mérito.

2.4.2. Codificação das Variáveis

Normalmente os AG's não lidam directamente com o vector de variáveis de projecto $x = (x_1, \dots, x_n)$, mas trabalham com a codificação desse vector num cromossoma contendo genes, representado por $x = (a_1, \dots, a_k) \in B^k$, sendo $B = \{0,1\}$. Os AG's consideram o cromossoma

a dividido em k genes a_{i1}, \dots, a_{ik} , $\in B^k$ que codificam a variável de projecto x_i (Cardoso e al. 2002).

A descodificação de cada segmento do cromossoma no respectivo valor da variável de projecto x_i é efectuada transformando os genes contidos no segmento num número inteiro positivo z_i por aplicação de Ψ^i e, em seguida, transformando z_i no valor da variável de projecto x_i , através de χ^i (Cardoso e al. 2002).

$$z_i = \left(\sum_{j=0}^{k'-1} a_i (k' - 1) \cdot 2^j \right) ; \quad z_i = \Psi^i(a_{i1}, \dots, a_{ik'}) : B^{k'} \rightarrow Z_0^+ \quad (2.4)$$

$$x_i = u_i + \left(\frac{v_i - u_i}{2^{k'-1}} \right) \times z_i ; \quad x_i = \chi^i(z_i) : Z_0^+ \rightarrow [u_i, v_i] \quad (2.5)$$

Na segunda equação os valores de u_i e v_i são os extremos do intervalo de variação da variável x_i . Na obtenção da transformação linear χ^i fez-se corresponder ao valor de u_i o segmento i com todos os genes iguais a zero e ao valor v_i o segmento i com todos os genes iguais a 1.

De acordo com Hajela (1992) a representação de um número binário com m dígitos, de uma variável contínua, permite 2^m variações distintas dessa variável a ser considerada. Se a uma variável for requerida a precisão de A_c , então o número de dígitos do cromossoma binário pode ser estimado a partir da seguinte relação:

$$2^m \geq \frac{(v_i - u_i)}{(A_c + 1)} \quad (2.6)$$

onde v_i e u_i são os limites superior e inferior da variável x .

2.4.3. Avaliação do Mérito

Na maioria das aplicações é utilizada a técnica da penalização para introduzir as restrições do problema na própria função objectivo e transformar os problemas de optimização estrutural em problemas de optimização sem constrangimentos.

Para avaliar a aptidão de um cromossoma, os genes do cromossoma são descodificados em variáveis de projecto. Com estas variáveis é calculado o valor da função objectivo. Se algum dos constrangimentos for violado, uma penalização é aplicada à função objectivo

multiplicando esta por um valor superior à unidade. O resultado da função objectivo penalizada é uma medida da performance de cada cromossoma e permite calcular o respectivo mérito que desempenha um papel fundamental no processo de selecção. A seguir são apresentados vários esquemas de penalização da função objectivo.

2.4.3.1. Penalização Linear

Um das funções de penalização mais simples é a função de penalização linear. Considerando um problema onde são impostos constrangimentos de tensão e de deslocamento, é verificado se cada elemento estrutural viola o constrangimento de tensão, e se cada nó do modelo viola o constrangimento de deslocamento. Se não for encontrada nenhuma violação, então não é aplicada nenhuma penalização da função objectivo. Se um constrangimento for violado, então a penalidade é definida da seguinte forma:

$$\Phi_i = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{|p_i|}{p_{max}} \leq 1 \\ \frac{k_1|p_i|}{p_{max}} & \text{se } \frac{|p_i|}{p_{max}} > 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

onde Φ_i é o valor da penalização para o constrangimento i , p_i é um parâmetro estrutural ou resposta (deslocamento, tensão, etc.), p_{max} é o valor máximo permitido de p_i , e k_1 é taxa de penalização. A figura 2.3 mostra uma função de penalização linear.

2.4.3.2. Penalização Não Linear

Outro tipo de função de penalização é a função não linear definida como:

$$\Phi_i = 1 + k_2(q_i - 1)^n \quad (2.8)$$

onde k_2 é a taxa de penalização não linear, n é a ordem da não linearidade, e q_i é definido como:

$$\Phi q_i = \begin{cases} 1 & \text{se } \frac{|p_i|}{p_{max}} \leq 1 \\ \frac{|p_i|}{p_{max}} & \text{se } \frac{|p_i|}{p_{max}} > 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

Depois de obtidos os factores da função de penalização, o grau de adaptação de um cromossoma particular é obtido multiplicando a função objectivo pelo factor de penalização correspondente:

$$F_p = f(x) \prod_{i=1}^m \Phi_i \quad (2.10)$$

onde F_p é a função objectivo penalizada, m é o numero total de constrangimentos, $f(x)$ é a função objectivo principal, e o produto representa o total da penalização.

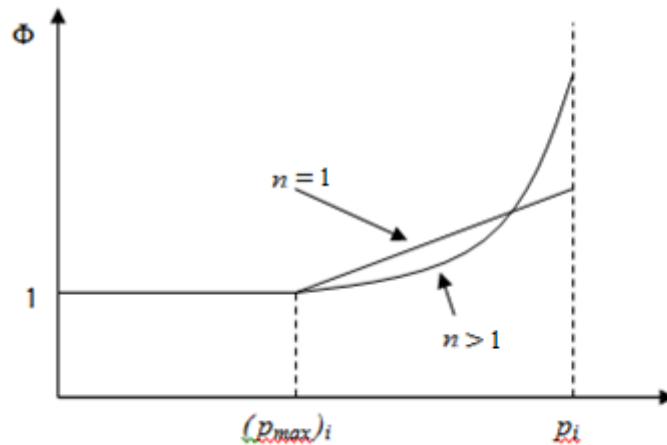


Figura 2.3: Funções de penalização típicas: Linear e não linear.

2.4.3.3. Escala de Mérito

Nas gerações iniciais, é comum haver alguns cromossomas extraordinários na população. Por exemplo, se utilizarmos o método da roleta, os cromossomas extraordinários podem ocupar uma parte significativa da população numa única geração, e isto pode ser indesejável e resultar em convergência prematura (Dhinda e Lee, 1994). Nas gerações seguintes, pode haver ainda uma diversidade significativa na população, mas, a média do valor da função objectivo pode ser próxima do melhor cromossoma. Se esta situação não for alterada, um cromossoma com valor médio e um cromossoma com um valor alto da função objectivo terão aproximadamente a mesma probabilidade de serem seleccionados para as gerações futuras. Neste caso, a “sobrevivência do mais apto” necessária para a optimização torna-se numa procura ao acaso.

Um método para suavizar a convergência consiste em modificar o mérito dos membros da população, limitando probabilisticamente o número máximo de cópias para a próxima geração.

Um procedimento útil consiste em usar uma escala linear entre a função de mérito, f' , e a função objectivo penalizada, f , proposto por Dhinga e Lee, (1994):

$$f' = af + b \quad (2.11)$$

Onde a e b são escolhidos de modo a que a recta passe pelos pontos $(f_{med}; f'_{med})$ e $(f_{max}; f'_{max})$. Os parâmetros f_{med} e f_{max} são respectivamente os valores médio e máximo da função objectivo encontrados na população e os pares correspondentes, são os seus valores correspondentes do mérito. O primeiro ponto tem a finalidade de garantir que os indivíduos medianos consigam manter uma cópia para a próxima geração. Para tentar garantir essa cópia, faz-se então $f'_{med} = f_{med}$. O segundo ponto tenta restringir o número máximo de cópias para o melhor indivíduo. Ele é calculado em relação a f_{med} , da seguinte maneira:

$$f'_{max} = C \times f_{med} \quad (2.12)$$

para pequenas populações (50 a 100) $C = 1.2$ a 2 foi aplicado com sucesso (Chen, 1997). A próxima figura mostra o uso da escala linear em condições normais.

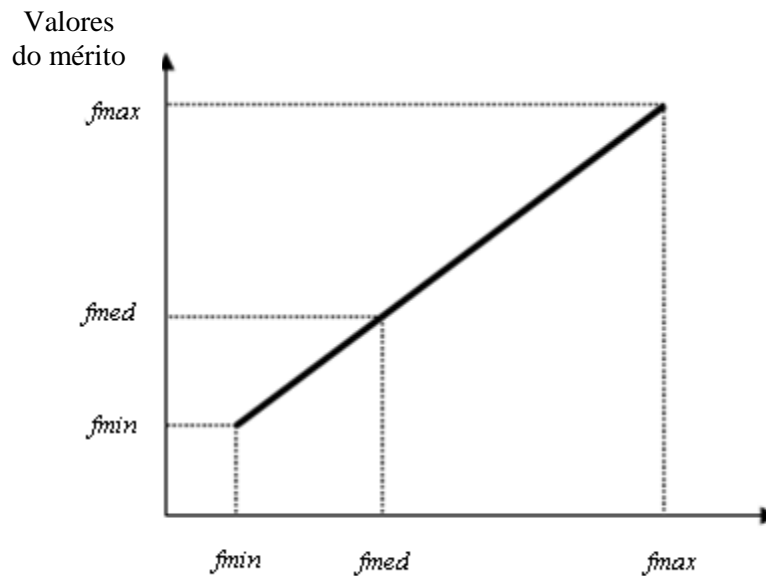


Figura 2.4: Escala linear em condições normais

Um problema surge quando a população começa a ficar uniformizada, ou seja, f_{med} aproxima-se de f_{max} . Neste ponto, os indivíduos que estão bem abaixo da média podem ter valores de mérito negativos como mostrado na figura seguinte. Para eliminar este problema, define-se $f' = 0$ quando $f' < 0$.

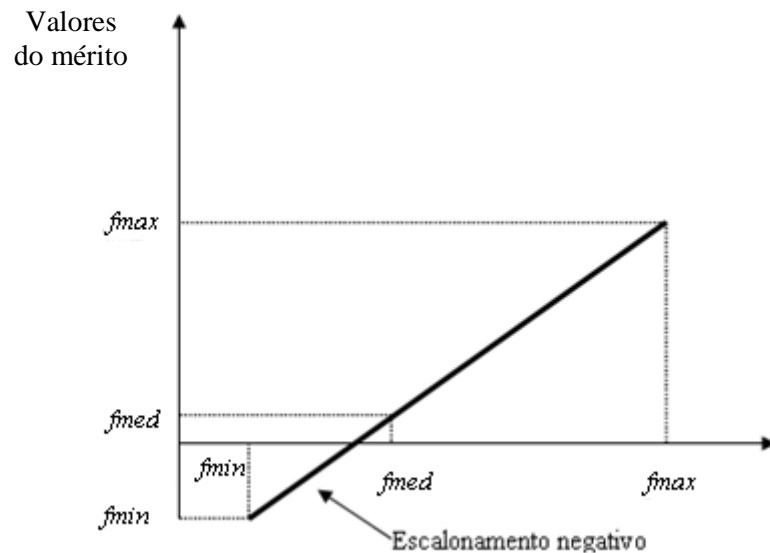


Figura 2.5: Dificuldades com o uso de escala linear em gerações futuras

Outro tipo de escala de mérito muito usada baseia-se na ordenação (*rank*) dos cromossomas e tem a vantagem de ser de fácil aplicação e de permitir a fácil transformação de problemas de minimização da função objectivo em problemas de maximização do mérito. Os cromossomas são ordenados por ordem decrescente da correspondente função objectivo penalizada. Em seguida a cada um é atribuído um mérito igual ao número de ordem, isto é, ao primeiro é atribuído o mérito 1, ao segundo o mérito 2, etc.

2.4.4. Operador Selecção

O processo de reprodução inclui um processo de selecção. Há uma série de esquemas de selecção usados nos AG's modernos que incluem selecção proporcional, selecção por ranking, selecção por torneio, etc... Uma comparação entre os vários esquemas foi feita por Goldberg e Deb (1991). Como breve introdução aos métodos de selecção é feita uma comparação entre selecção por roleta e selecção por torneio.

2.4.4.1. Selecção Proporcional – Método da Roleta

Na selecção proporcional, a probabilidade de selecção (P_{si}), é calculada pela seguinte expressão, Jenkins (1991a):

$$P_{si} = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (2.13)$$

onde f_i é o valor do mérito do cromossoma i e $\sum f_i$ é a soma dos méritos de toda a população. O resultado é que os cromossomas com maior valor do mérito têm uma maior probabilidade de selecção durante a reprodução.

Um dos métodos muito utilizados para efectuar uma selecção deste tipo é o conhecido “método da roleta”, onde cada indivíduo da população é representado proporcionalmente ao seu índice de aptidão. Assim, os indivíduos com alta aptidão recebem uma porção maior da roleta, enquanto que os de baixa aptidão ocuparão uma porção relativamente menor. Deste modo, realizam-se o lançamentos da roleta, dependendo do tamanho da população, e escolhem-se para população temporária os indivíduos por ela sorteados.

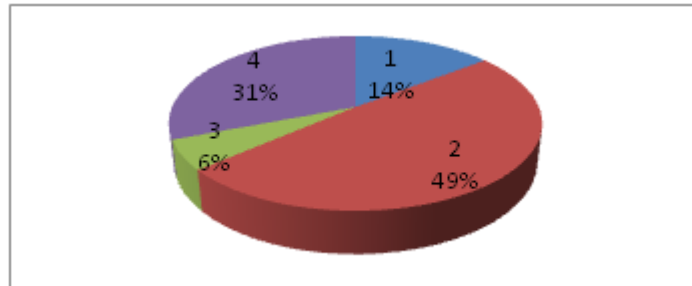


Figura 2.6: No método da roleta, a probabilidade de selecção é igual ao mérito.

Este método tem a desvantagem de possuir uma alta variância, podendo levar a um grande número de cópias de um bom cromossoma, o que faz diminuir a diversidade da população. Para ultrapassar este obstáculo é possível aplicar as técnicas de escala de mérito já apresentadas.

2.4.4.2. *Seleção por torneio*

Este é um dos modelos mais simples para implementação computacional que permite obter bons resultados.

A ideia é escolher aleatoriamente um grupo de N ($N \geq 2$) indivíduos na população e realizar um torneio entre eles. Comparam-se os valores do mérito e o que tiver maior valor é o vencedor. Este tipo de selecção não depende do valor absoluto do desempenho dos indivíduos, mas depende apenas do valor relativo, o que se traduz nas seguintes vantagens:

- A selecção não favorece especialmente os melhores indivíduos, o que trava uma convergência prematura do algoritmo.
- É relativamente insensível à técnica usada para a escala de mérito, funcionando bem quando os cromossomas têm méritos muito próximos.
- O processo de selecção é independente do valor da função objectivo, podendo esta assumir valores negativos.

2.4.5. Operador Cruzamento

Um dos operadores genéticos mais importantes é o cruzamento. Este operador cruza a informação genética de dois cromossomas seleccionados de entre a subpopulação. Desta forma consegue-se explorar outras soluções no domínio D e reunir sucessivamente a melhor informação genética que conduz ao valor óptimo.

O processo de selecção não introduz novos indivíduos na população temporária, apenas permite obter os progenitores, para a nova geração, composta pelos seus filhos. Depois da selecção, segmentos de cada cromossoma são escolhidos ao acaso (comprimento do segmento e localização), e a informação contida nesses segmentos é trocada entre os dois cromossomas. Vários métodos podem ser usados para escolher o comprimento e localização do segmento. Nesta secção são apresentados os métodos de cruzamento num ponto único, multi-ponto, e cruzamento uniforme. A figura 2.7 mostra-nos dois cromossomas que vão ser usados para ilustrar os diferentes métodos de cruzamento.

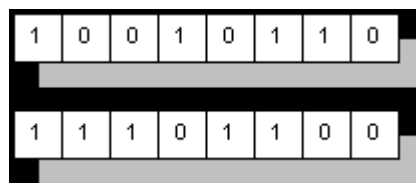


Figura 2.7: Cromossomas binários provenientes da selecção

Para efectuar o cruzamento de ponto único, é escolhido ao acaso a zona onde vai ser feita o cruzamento. A figura 2.8 ilustra um exemplo deste tipo de cruzamento.

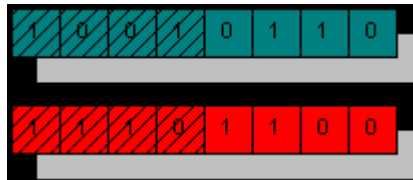


Figura 2.8: No cruzamento são trocados os genes de um cromossoma a partir de uma posição aleatória.

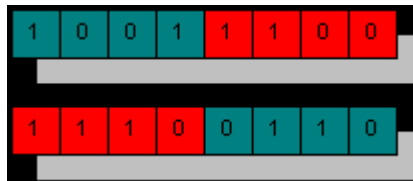


Figura 2.9: Cromossomas resultantes do cruzamento.

No cruzamento multi-ponto a troca é feita em duas ou mais localizações escolhidas ao acaso. As figuras 2.10 e 2.11 ilustram o cruzamento multi-ponto.

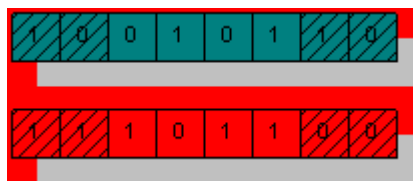


Figura 2.10: No cruzamento multi-ponto são trocados os genes de um cromossoma entre duas posições aleatórias.

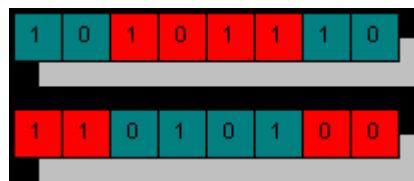


Figura 2.11: Cromossomas resultantes do cruzamento.

O cruzamento uniforme é baseado num cromossoma binário criada aleatoriamente, chamada máscara (Syswerda, 1989). Os cromossomas progenitores trocam os genes na posição onde a corresponde posição na mascara é zero. De outro modo, nenhuma troca de genes é efectuada. A percentagem dos genes trocados entre os dois cromossomas, pode variar de 0% a 50% seleccionando a percentagem de zeros no cromossoma mascara. As figuras 2.12 e 2.13 ilustram como a operação de cruzamento uniforme funciona.

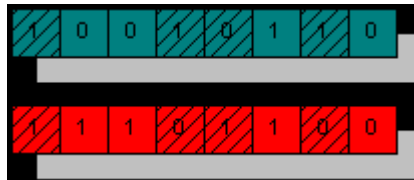


Figura 2.12: A máscara gerada aleatoriamente determina quais os genes dos cromossomas a serem trocados.

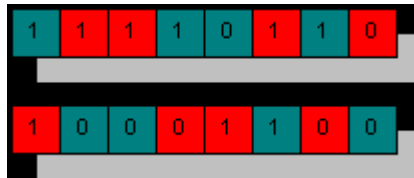


Figura 2.13: Cromossomas resultantes do cruzamento uniforme.

Embora a localização do cruzamento seja escolhida ao acaso, o cruzamento não é o mesmo que uma procura ao acaso no espaço de pesquisa. Como o cruzamento é baseado no processo de selecção descrito, é um meio eficiente de troca de informação e combinação de porções de cromossomas.

2.4.5.1. *Cruzamento adaptativo*

Nos AG's, há diferentes formas de cruzamento. Tradicionalmente, os AG's utilizam os operadores de cruzamento de ponto único e multi-ponto, mas há situações em que se houvesse um número maior de pontos de cruzamento seria benéfico (Syswerda, 1989 e Eshelman e tal., 1989). Talvez o resultado mais surpreendente (na perspectiva do esquema tradicional) é a eficiência do cruzamento uniforme. O cruzamento uniforme produz, em média, $L/2$ cruzamentos no cromossoma de comprimento L (Syswerda, 1989 e Spears e De Jong, 1991).

A teoria actual dos AG's é inadequada para determinar *a priori* quais os tipos de operadores a usar num problema particular. Uma técnica possível seria por exemplo, um mecanismo adaptativo que poderia escolher os diferentes tipos de cruzamento: uni-, multi-, e uniforme. Os cruzamentos uni- e multi-ponto são os menos disruptivos para a população, enquanto o cruzamento uniforme é o operador mais disruptivo, De Jong e Spears (1992). Além disso, é natural permitir ao AG's explorar uma mistura relativa destes operadores.

Um método óbvio para a auto-adaptação dos AG's no uso de diferentes operadores de cruzamento é adicionar dois genes no fim de cada indivíduo da população. Supondo que "00"

refere-se ao cruzamento uni-ponto, “01” ao cruzamento bi-ponto, “10” ao cruzamento tri-ponto, e “11” ao cruzamento uniforme. Se o cruzamento uniforme mover a procura para espaços de solução com alto grau de adaptação, então devem aparecer mais “11”s nas duas últimas colunas no desenvolvimento do AG. Se forem encontrados valores mais baixos da função objectivo com o uso do cruzamento multi-ponto, mais “01”s deverão aparecer. A procura é auto-adaptativa, o cruzamento e mutação podem manipular estas duas colunas extra.

Há duas técnicas possíveis para o uso destes genes extra: adaptação global e local. Na adaptação local, os últimos dois genes de cada cromossoma são usados para seleccionar que tipo de cruzamento é usado. Por exemplo, supondo dois cromossomas escolhidos para o cruzamento, se os últimos dois genes em cada cromossoma forem “11”, então o cruzamento uniforme é efectuado. Se os últimos dois genes forem diferentes, os operadores de cruzamento são escolhidos ao acaso (Chen, 1997).

Na adaptação local, a escolha do operador de cruzamento é determinado por um cromossoma particular. Na adaptação global, a escolha do operador de cruzamento é determinado pela população inteira. Por exemplo, supondo que 40% da população tem “00” nos dois últimos genes, e 25% tem “11”, então o cruzamento aplicado à população deverá ser 40% do tempo uni-ponto, e 25% do tempo deverá ser aplicado o cruzamento uniforme.

2.4.6. Operador Mutação

Outro operador usado nos AG's é a mutação, que funciona como o fenómeno de mutação natural. O operador de mutação é geralmente aplicado a todos os cromossomas antes de integrarem uma nova geração. Este operador é necessário para a introdução e manutenção da diversidade genética na população, alterando arbitrariamente um ou mais genes de um cromossoma. Fornece assim, meios para a introdução de novos elementos na população, assegurando que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de procura nunca seja zero.

A mutação é um operador que actua com uma probabilidade associada muito baixa. Quando usada em conjunto com a selecção e o cruzamento, funciona como uma apólice de seguro contra a perda prematura de informação importante (Goldberg, 1989). As figuras ilustram dois exemplos de mutação.



Figura 2.14: Cromossoma antes da mutação simples (primeiro cromossoma) e depois (segundo).

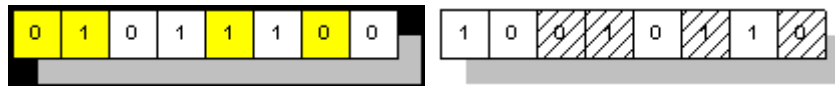


Figura 2.15: Cromossoma antes da mutação uniforme (primeiro cromossoma) e depois (segundo).

Na mutação simples, apenas um gene aleatório por cromossoma é alterado. A mutação uniforme, à semelhança do cruzamento uniforme, é também criada uma máscara que indica os genes a serem mutados.

2.4.7. *Gatool* – Algoritmo Genético do Matlab

Nesta secção apresenta-se a *gatool*, a ferramenta de algoritmos genéticos do MATLAB. Pretende-se explicar o seu funcionamento e as suas opções mais importantes.

Para iniciar a ferramenta, introduz-se “*gatool*” na linha de comandos do MATLAB. A figura seguinte apresenta o ambiente gráfico do *gatool*.

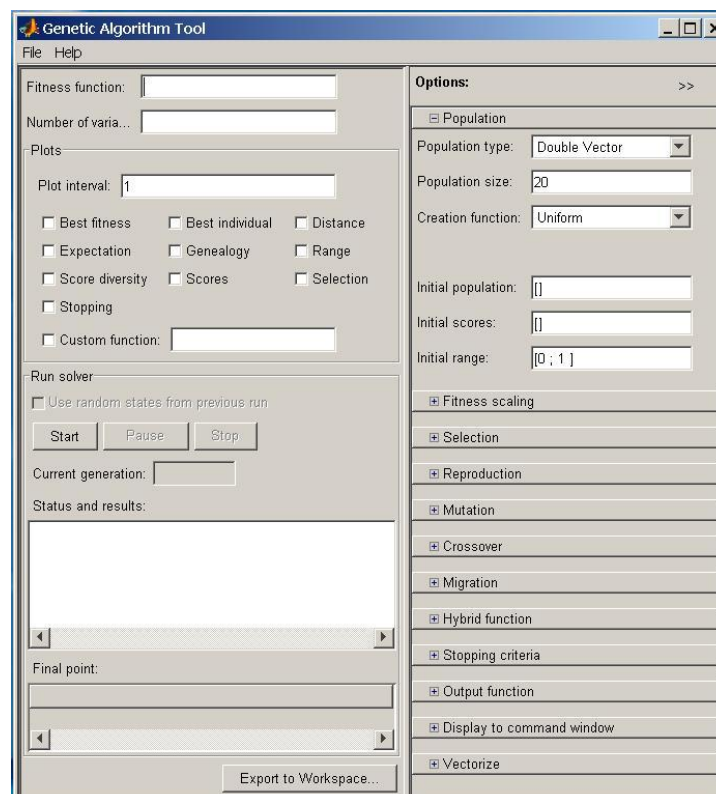


Figura 2.16: Ambiente gráfico da ferramenta de Algoritmo Genético do MATLAB – *gatool*

Na caixa *Fitness function* introduz-se a função a minimizar. É introduzida a designação de um *M-file* que define essa mesma função indicando @function, sendo neste caso *function* o nome dado ao *M-file*. Em *Number of variables* introduz-se o número de variáveis independentes. Para correr o algoritmo genético, clica-se em *Start* no separador *Run solver*.

No separador *options* encontram-se as opções principais do *gatool*. Para obter os melhores resultados do algoritmo genético, normalmente é necessário experimentar as diferentes opções. A escolha das melhores opções para o problema envolve tentativa e erro.

Um dos factores mais importantes que determina a performance do algoritmo genético é a diversidade da população. Nas opções de população (*Population*) é possível especificar os parâmetros da população usados pelo algoritmo genético. A opção *Double vector* deve ser utilizada se os genes forem variáveis reais. A opção *Bit string* é utilizada quando os indivíduos da população têm cromossomas com genes binários.

Fitness scaling é uma escala de mérito utilizada para controlar os cromossomas extraordinários na população inicial, e deste modo evitar a convergência prematura do algoritmo genético (ver secção 2.4.3.3.). A escala do tipo *Rank* baseia-se na ordenação dos indivíduos de acordo com o valor da função objectivo como explicado na secção 2.4.3.3. A escala proporcional (*proportional*) atribui um relacionamento proporcional entre o valor da função objectivo e o valor do mérito.

A função de selecção (*Selection function*) escolhe os progenitores da geração seguinte de acordo com os valores da escala de mérito. Um indivíduo pode ser escolhido mais do que uma vez como progenitor, e neste caso os seus genes contribuem para mais do que um indivíduo da geração seguinte. Dentro das várias opções possíveis, a opção Estocástica uniforme (*Stochastic uniform*) é a utilizada por defeito. Nesta opção é traçada uma recta onde cada progenitor corresponde a uma secção dessa recta, proporcional ao seu valor escalonado. O algoritmo move-se sobre a recta em passos de igual comprimento. A cada passo, o algoritmo escolhe o progenitor a que esse passo corresponde. A opção de Roleta modificada (*Remainder*), selecciona os progenitores deterministicamente através do valor inteiro do valor do mérito. Por exemplo, se a um indivíduo for atribuído um mérito 2.3, este indivíduo é listado duas vezes como progenitor devido ao valor inteiro 2. Depois dos progenitores terem sido escolhidos de acordo com a parte inteira do seu mérito, os restantes progenitores são escolhidos estocásticamente. A probabilidade de cada progenitor ser escolhido nesta fase é proporcional ao valor decimal do seu mérito. A opção Uniforme (*Uniform*), escolhe os progenitores de acordo com a aptidão e o número de progenitores. A Roleta (*Roulette*) escolhe

os progenitores simulando a Roleta, onde a área da secção da roleta que corresponde a um indivíduo é proporcional à sua aptidão. A opção de selecção por Torneio (*Tournament*) realiza um torneio entre um grupo de indivíduos aleatoriamente escolhidos da população. Os valores do mérito de cada indivíduo são comparados e o que tiver maior valor é o vencedor.

A opção Reprodução (*Reproduction*) permite usar ou não uma estratégia elitista, em que são copiados para a geração seguinte os n melhores elementos da geração actual.

As opções de Mutação especificam como o algoritmo genético faz pequenas alterações ao acaso nos indivíduos da população para criar filhos mutantes. A Mutação permite diversidade genética e aumenta o espaço de procura do algoritmo genético. Dentro das opções de Mutação as mais importantes são do tipo Gaussiana (*Gaussian*) e Uniforme (*Uniform*). Por defeito, a opção de mutação do *Gatool* é do tipo Gaussiana. Esta adiciona um número aleatório retirado de uma distribuição de Gauss de média 0, ao vector de cada progenitor. Tipicamente, a quantidade de mutação, que é proporcional ao desvio padrão da distribuição, decresce na geração seguinte. A quantidade média de mutação que o algoritmo aplica a cada progenitor pode ser controlada através das opções *Shrink* e *Scale*. A opção *Shrink* controla a taxa a que a quantidade média de mutação decresce nas gerações seguintes. A opção *Scale*, controla o desvio padrão standard da mutação na primeira geração.

A opção de Cruzamento (*Crossover*) especifica como é que o algoritmo genético combina dois indivíduos, ou progenitores, de modo a originar um indivíduo filho na geração seguinte. A opção de cruzamento inclui opções do tipo Disperso (*Scattered*) (opção por defeito), onde um vector do tipo binário é criado ao acaso e escolhe genes onde o vector é 1 do primeiro progenitor, e os genes onde o vector é 0 do segundo progenitor. Na opção de cruzamento de Ponto único (*Single point*) um ponto de cruzamento é escolhido, a série binária desde o começo do cromossoma até o ponto de cruzamento é copiada do primeiro progenitor e o restante do segundo progenitor. Na opção de cruzamento Dois pontos (*Two point*) são definidos dois pontos de cruzamento, a série binária desde o início do cromossoma até o primeiro ponto de cruzamento é copiada do primeiro progenitor, a parte do primeiro ponto de cruzamento até o segundo ponto copiada do outro progenitor e o resto do cromossoma é copiado do primeiro progenitor novamente. O método Intermédio (*Intermediate*) origina filhos através da média ponderada dos progenitores. Por último, a opção de cruzamento Heurística (*Heuristic*), consiste em gerar um cromossoma filho a partir de uma interpolação linear entre os pais utilizando informação como a aptidão. O cruzamento heurístico favorece o pai com maior mérito.

Capítulo 3

METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO

Apresenta-se a metodologia de optimização estrutural implementada que usa um algoritmo genético para realizar optimização estrutural usando duas ferramentas distintas, o programa ANSYS para realizar as análises de elementos finitos e o programa MATLAB para executar o algoritmo genético.

Como já foi referido anteriormente, um dos inconvenientes do uso de algoritmos genéticos em optimização estrutural é o excessivo tempo de cálculo que estes algoritmos requerem, principalmente quando estão envolvidas análises de elementos finitos. Por isso procurou-se adicionar à metodologia tradicional de acoplamento algoritmo genético – programa de elementos finitos, a capacidade de aproveitar a existência de vários computadores ligados em rede usando processamento paralelo. Para tal foi criado um programa de interface usando a linguagem FORTRAN com instruções MPI, que permite distribuir por vários computadores a tarefa de realizar as várias análises de elementos finitos necessárias para cada geração do algoritmo genético.

3.1. Modelação em APDL para Optimização Estrutural

O pacote comercial ANSYS possui ferramentas que permitem acções interactivas (através do *ANSYS-Interactive*) ou executadas em forma de um programa em modo parametrizado (*Ansys Parametric Development Language-APDL*), ou ainda com desenvolvimento de interfaces gráficas para o usuário final (*Ansys Workbench*).

O APDL é um recurso de programação disponível e utilizado neste trabalho devido ao seu potencial e facilidade de uso. A programação em *batch* auxilia bastante o processo de modelação e análise, principalmente quando há procedimentos repetitivos implementados. A linguagem APDL pode ser utilizada para separar parâmetros do ficheiro de modelação e introduzi-los noutra ficheiro. As respostas ou resultados das análises podem ser também separadas em diferentes ficheiros. Este modelo de input-análise-resposta pode ser facilmente adaptado a programas de optimização independentes, como o *gatoool* (secção 2.4.7.).

O processo genérico de otimização estrutural que utiliza um programa externo de otimização, é executado da seguinte forma:

1. O utilizador cria um ficheiro de input em linguagem APDL de modo a poder ser utilizado pelo ANSYS em modo *batch*. As variáveis de projecto, função objectivo, e constrangimentos podem ser interligados a variáveis criadas pelo utilizador no ANSYS.
2. Paralelamente com o ponto 1, o utilizador prepara o programa externo de optimização de modo a originar iterativamente o ficheiro de input a ser lido pela linguagem APDL, e de modo a ler o ficheiro de resposta que contem os resultados da análise de elementos finitos necessárias para o processo de optimização.
3. O programa de optimização é executado.
4. Quando o programa de optimização é executado, este escreve o ficheiro de dados em linguagem APDL e lança a ordem de execução do ANSYS em modo *batch*. O ANSYS por sua vez executa os comandos APDL que estão no ficheiro que define a análise e onde existe um comando de leitura que lê os dados do ficheiro originado pelo programa de optimização. No fim da análise, um ficheiro com os resultados pretendidos é criado.
5. O programa de optimização lê o ficheiro de resultados, avalia esses mesmos resultados com o algoritmo de optimização e altera o ficheiro de dados.
6. Os pontos 4 e 5 são repetidos num ciclo até a convergência ser obtida.

No caso específico do programa de optimização ser um algoritmo genético, um número bastante elevado de ciclos são necessários o que pode levar a um excessivo tempo de cálculo. A cada indivíduo está associada uma análise de elementos finitos, executada em série, para obter o mérito de cada um. No caso de uma população de 25 indivíduos, 25 análises de elementos finitos são necessárias antes do algoritmo genético poder aplicar os operadores genéticos e proceder à próxima iteração, que por sua vez necessitará de outras 25 análises de elementos finitos.

O *gatoool* permite correr o algoritmo genético em modo *vectorized*, onde o mérito de todos os indivíduos da população é avaliado em simultâneo. Um terceiro programa pode então ser acoplado, funcionando como interface entre o algoritmo genético (*gatoool*) e o ANSYS, de

modo a gerir o pedido de avaliação do mérito e a distribuí-lo por diversos computadores em paralelo. Tal programa foi escrito em linguagem FORTRAN e utiliza instruções MPI (*Message-Passing Interface*) para executar o processamento paralelo.

3.2. Linguagem MPI

A programação paralela consiste na programação das acções que vão ser executadas pelo computador de forma que ocorram em simultâneo. O objectivo é normalmente executar um algoritmo que envolva grande quantidade de cálculo (ou que requeira uma grande quantidade de dados em memória) mais rapidamente. Nos sistemas de memória distribuída, várias partes de um programa são executadas simultaneamente em vários computadores independentes (com CPU e memória distintos) enviando entre si toda a informação que é necessária através de chamadas a funções especializadas como as definidas no protocolo MPI. Essas várias partes designam-se processos. Cada processo é distinto dos restantes e é identificado, em MPI, por um número (*id*): 0, 1, 2, 3, etc, de forma a que não possa ser confundido.

O MPI (*Message-Passing-Interface*) é um dos protocolos de comunicação mais utilizados em programação paralela pela portabilidade e velocidade de execução que proporciona às aplicações. Embora não corresponda a nenhuma norma, constitui um standard ‘de facto’ para comunicação entre processo e permite construir aplicações que são executadas em paralelo em sistemas de memória distribuída que vão desde pequenos agrupamentos de computadores (*Beowulf Clusters*) até supercomputadores.

Muitas das implementações de MPI consistem em bibliotecas de subrotinas que podem ser chamadas a partir de programas escritos em linguagens FORTRAN, C ou C++. Neste trabalho utilizou-se a versão MPITCH e a linguagem FORTRAN.

Na presente metodologia, foi utilizada a versão MPICH (*Message Passing Interface Portable Implementation*), que vem incluída no DVD do ANSYS11. O MPICH é uma implementação de MPI disponível gratuitamente. No programa desenvolvido são utilizadas instruções MPI de inicialização e finalização e apenas duas instruções de transferência de dados. O quadro seguinte resume cada uma dessas instruções utilizadas.

Instrução	Parâmetro de entrada	Parâmetro de saída	Descrição
MPI_INIT(ierr)	-	Ierr - devolve o código do erro da operação	Deve ser chamada por todos os processos no início do programa
MPI_COMM_RANK (communicator, iTerminalID, Ierr)	Communicator – utilizar MPI_COMM_WORLD, variável definida em mpif.h	iTerminalID – devolve o id do terminal Ierr – devolve o código do erro da operação	Cada processo utiliza a subrotina MPI_COMM_RANK () para obter o seu id correspondente. O primeiro id é o (mestre) e os outros computadores recebem id na sequência (1,2 etc)
MPI_COMM_SIZE (communicator, iNumHosts, Ierr)	Communicator – utilizar MPI_COMM_WORLD, variável definida em mpif.h	iNumHosts – número de processos a correr	Devolve o número de processos através da variável iNumHosts . Normalmente cada processo representa um computador diferente. Pode haver mais de um processo a correr no mesmo computador, dependendo da configuração da MPI
MPI_GET_PROCESSOR_NAME (nome_maquina, tamanho_nome_maquina)	-	-	Devolve o nome do computador no qual o processo está a ser executado
MPI_FINALIZE (Ierr)	-	Ierr - devolve o código do erro da operação	Deve ser chamada por todos os processos no final do programa
MPI_SEND (buffer, numero_de_elementos, tipo_de_dado, id_processo_destino, tag, communicator, Ierr)	buffer – endereço de memória onde a informação que será enviada inicia-se numero_de_elementos – numero de elementos que serão enviados a partir da posição inicial passada em buffer tipo_de_dado – tipo de elemento id_processo_destino – id do processo que irá receber a informação. Tag – valor inteiro qualquer identificando a mensagem. O processo destino deverá chamar a função MPI_RECV () com a mesma tag Communicator – utilizar MPI_COMM_WORLD, variável definida em mpif.h	Ierr - devolve o código do erro da operação	Utiliza comunicação bloqueante*. Envia um buffer de numero_de_elementos do computador que chamou MPI_SEND () para o computador identificado por id_processo_destino . Para cada MPI_SEND () deve haver uma chamada MPI_RECV () correspondente no processo destino.
MPI_RECV (buffer, numero_de_elementos, tipo_de_dado, id_processo_que_enviou, tag, communicator, Status, Ierr)	numero_de_elementos – numero de elementos que serão enviados a partir da posição inicial passada em buffer tipo_de_dado – tipo de elemento id_processo_destino – id do processo que enviou a informação. Tag – valor inteiro qualquer identificando a mensagem. O processo destino deverá chamar a função MPI_RECV () com a mesma tag Communicator – utilizar MPI_COMM_WORLD, variável definida em mpif.h	buffer – endereço de memória onde a informação que será recebida inicia-se Ierr - devolve o código do erro da operação	Utiliza comunicação bloqueante*. Faz um par com MPI_SEND () . Recebe buffer de numero_de_elementos do computador que enviou a informação. Para cada MPI_RECV () deve haver uma chamada MPI_SEND () correspondente no processo que enviou a informação.
* comunicação bloqueante: tipo de comunicação em que o computador que vai receber uma mensagem aguarda até a mensagem chegar			

Tabela 3.1: Resumo das instruções MPI utilizadas

As instruções de transferência de dados (MPI_SEND e MPI_RECV) existem aos pares, isto é, num processo existe uma instrução MPI_SEND e noutro uma instrução MPI_RECEIVE

correspondente. São as instruções fundamentais para o processamento paralelo funcionar pois permitem enviar vectores de dados (inteiros, reais, etc...) de um processo a correr num computador do *cluster* para outro processo a correr em paralelo no mesmo computador ou noutra qualquer do mesmo *cluster*. O programa desenvolvido que usa as instruções indicadas é apresentado em anexo.

3.3. Descrição da Metodologia de Optimização

O objectivo é executar a ferramenta de algoritmos genéticos do MATLAB, a *gatool*, num dos computadores do conjunto disponíveis para cálculo. A *gatool* do MATLAB executa o algoritmo genético em modo *vectorized*, isto é pedindo a avaliação do mérito de todos os elementos da população em simultâneo. Para isso envia à função *ansys_vec_p* criada especificamente para este efeito um vector, x , de cromossomas e recebe outro vector, y , com os valores da função objectivo correspondentes.

A função *ansys_vec_p* é apresentada em anexo e está escrita em linguagem MATLAB. Para conseguir que o mérito seja avaliado em simultâneo em vários computadores através do programa ANSYS, criou-se um programa externo escrito em FORTRAN e que utiliza instruções MPI para controlar o processamento paralelo. Esse programa, designado por *ansys_paralelo.exe* é executado pela função *ansys_vec_p* como um processo independente simultaneamente em cada um dos computadores que compõem o *cluster* onde o ANSYS está instalado.

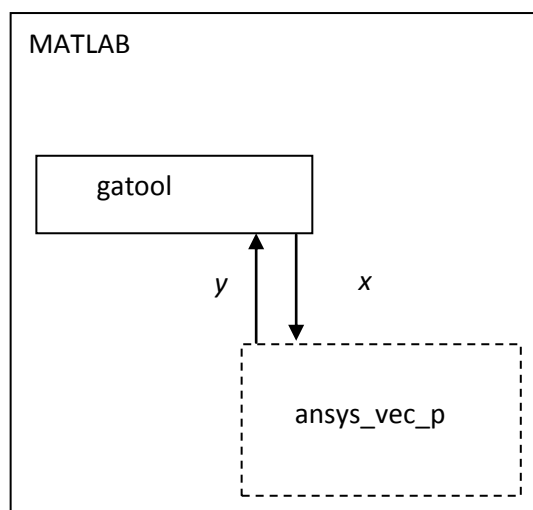


Figura 3.1: Funcionamento do algoritmo genético em modo *vectorized*.

O *ansys_paralelo.exe* é responsável por distribuir a informação relativa aos vários elementos da população pelos computadores que constituem o *cluster*, executar o ANSYS em cada um deles e recolher os resultados que envia à função *ansys_vec_p*. Para isso, o processo que executa no computador onde está o MATLAB (processo principal id=0) lê o ficheiro *variaveis_p.txt* e divide os conjuntos de dados relativos aos vários cromossomas pelos vários processos auxiliares (com id=1, 2, ...) disponíveis, enviando a cada um deles uma parte dessa informação. Cada um dos processos *ansys_paralelo.exe* calcula a sua parte da população e para isso efectua um ciclo em que, para cada elemento da população escreve um ficheiro designado *variaveis.txt* com os dados relativos a esse elemento, executa o ANSYS e lê o ficheiro *resultados.txt* com o correspondente resultado. No fim desse ciclo, os vários processos auxiliares enviam ao processo principal os resultados que obtiveram e que são escritos por este último processo no ficheiro *resultados_p.txt*, que contém todos os resultados para a população e que é depois lido pela função *ansys_vec_p*.

Este procedimento está representado na figura seguinte.

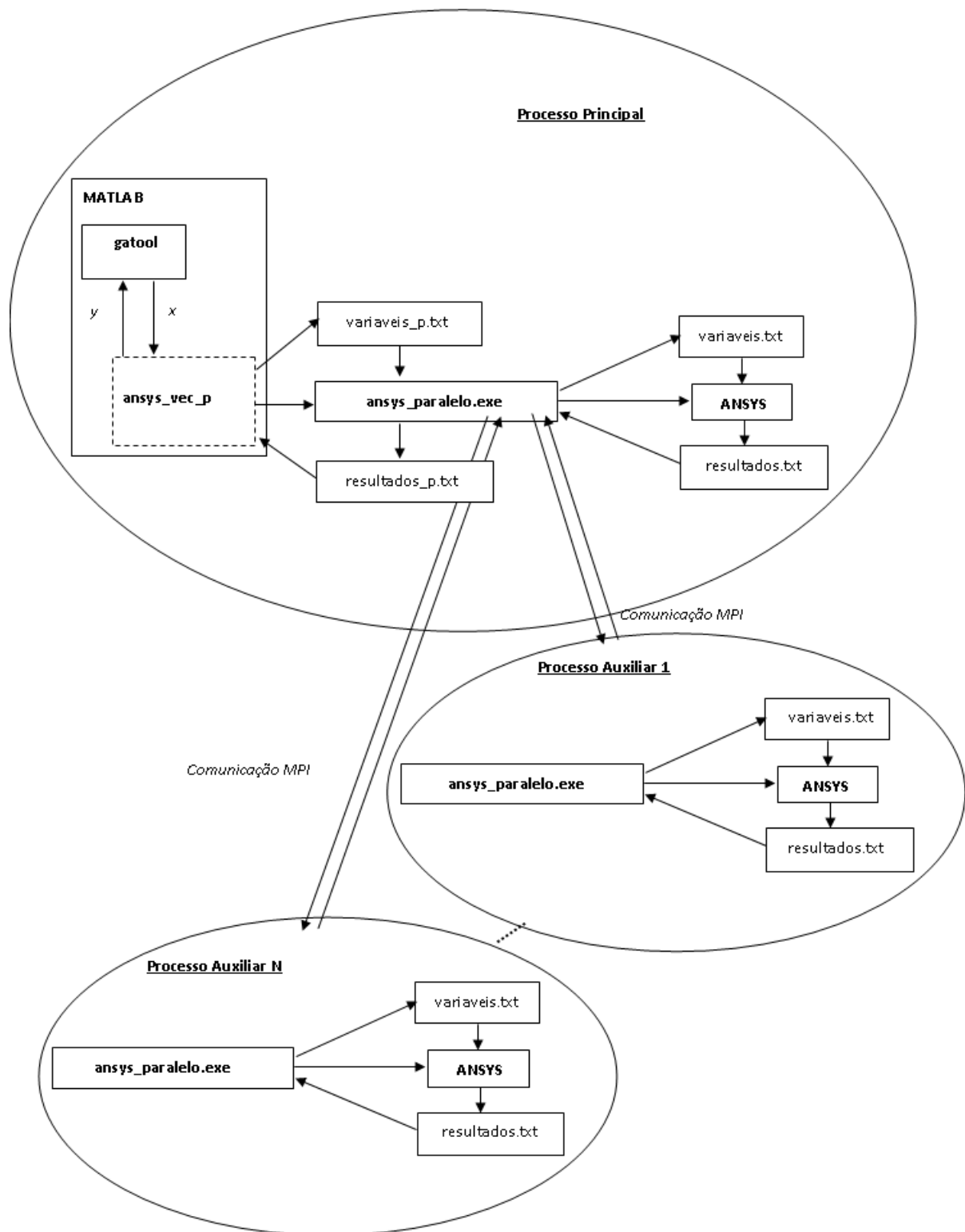


Figura 3.2: Procedimento para a otimização utilizando computação paralela

Capítulo 4

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

No presente capítulo apresentam-se três exemplos de aplicação de métodos computacionais. Dois dos exemplos são análises de elementos finitos não lineares elasto-plásticas. O terceiro exemplo inclui uma análise de dinâmica dos fluidos computacional e uma optimização estrutural via acoplamento de um algoritmo genético com a simulação de elementos finitos. Todos os exemplos são aplicações reais, em presente desenvolvimento e produção no CERN.

Por uma questão de organização, o capítulo 4 foi subdividido em 4 secções principais. A primeira (4.1), é uma pequena introdução ao método dos elementos finitos e ao modelo de material não linear elasto-plástico. A segunda secção (4.2) é o primeiro exemplo de aplicação prática, e utiliza o método dos elementos finitos aplicado ao projecto de um componente do *Newtron Time of Flight (nTOF)*. A terceira secção (4.3) é o segundo exemplo de aplicação, onde o método dos elementos finitos é utilizado para simular o processo de brasagem do *Radio Frequency Quadrupole (RFQ)*. A quarta e última secção (4.4) trata do exemplo prático da optimização estrutural dos canais de arrefecimento do *Pi-mode Structure (PIMS)*, através do algoritmo genético do Matlab acoplado a simulações de elementos finitos do ANSYS e, por se tratar de um exemplo relacionado com dinâmica dos fluidos, foi incluído neste caso um exemplo de análise de dinâmica dos fluidos computacionais.

4.1. Método dos Elementos Finitos

4.1.1. Introdução

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma técnica numérica para encontrar soluções aproximadas de equações diferenciais parciais (EDP) assim como de equações integrais. As soluções são baseadas na eliminação completa das equações diferenciais (problemas em regime permanente, ou na transformação das EDP num sistema aproximado de equações diferenciais ordinárias, que são então resolvidas com o uso de técnicas standard como o método de Euler, Runge-Kutta, etc.

Quando se resolvem as equações diferenciais, o primeiro passo é criar equações que se aproximam do problema a ser estudado, mas são numericamente estáveis, o que significa que pequenos erros nos dados não levam a resultados sem significado.

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o MEF tem como objectivo determinar o estado de tensão e de deformação de uma estrutura sujeita a acções exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, estruturas metálicas, etc. Quando existe a necessidade de projectar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objectivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

4.1.2. Tipos de Análise de Elementos Finitos

Quando aparece a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e acções aplicadas. O modo como o MEF é formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Referem-se em seguida alguns aspectos que é necessário ter em consideração na fase que antecede a análise de uma estrutura. Como os exemplos práticos apresentados nesta tese utilizam modelos de material não linear, em particular o *bilinear Kinematic Hardening*. Este último terá assim uma explicação mais detalhada.

4.1.2.1. Análise Dinâmica ou Estática

As acções sobre as estruturas são em geral dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações a que cada um dos seus componentes fica sujeito. Por este motivo, seria de esperar que a análise de uma estrutura teria obrigatoriamente de ter em consideração os efeitos dinâmicos. Contudo, em muitas situações é razoável considerar que as acções são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezáveis as forças de inércia. Nestes casos a análise designa-se estática. Nesta publicação apenas são considerados problemas em que se supõem válidas as simplificações inerentes a uma análise estática.

4.1.2.2. *Análise Não Linear ou Linear*

Na análise de uma estrutura, é habitual considerar que os deslocamentos provocados pelas acções exteriores são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Nestas circunstâncias, admite-se que não existe influência da modificação da geometria da estrutura na distribuição dos esforços e das tensões, i.e., todo o estudo é feito com base na geometria inicial não deformada. Se esta hipótese não for considerada, a análise é designada não linear geométrica.

É também frequente considerar que, ao nível do material que constitui a estrutura, a relação entre tensões e deformações é linear. Nos casos em que esta simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material.

4.1.3. *Modelo de material bi-linear*

Alguns factores relacionados com as propriedades de material podem levar à alteração da resistência da estrutura durante o curso da análise. Relações tensão-extensão que incluam plasticidade, elasticidade não linear, e materiais hiperelásticos alteram a rigidez da estrutura para diferentes níveis de carga (e, tipicamente, a temperaturas diferentes). Este e outros tipos de propriedades de material podem ser incorporados numa análise de elementos finitos.

Os materiais de engenharia mais comuns exibem curvas de tensão-extensão lineares até um nível de tensão conhecido como limite de proporcionalidade. Depois desse limite, a relação tensão-extensão torna-se não linear, mas não se torna necessariamente plástica. O comportamento plástico, caracterizado pela extensão não recuperável, começa quando as tensões excedem o limite de elasticidade do material. Devido à usual pequena diferença entre o limite de elasticidade e o limite de proporcionalidade, normalmente assume-se que estes pontos coincidem na análise de plasticidade (figura 4.1).

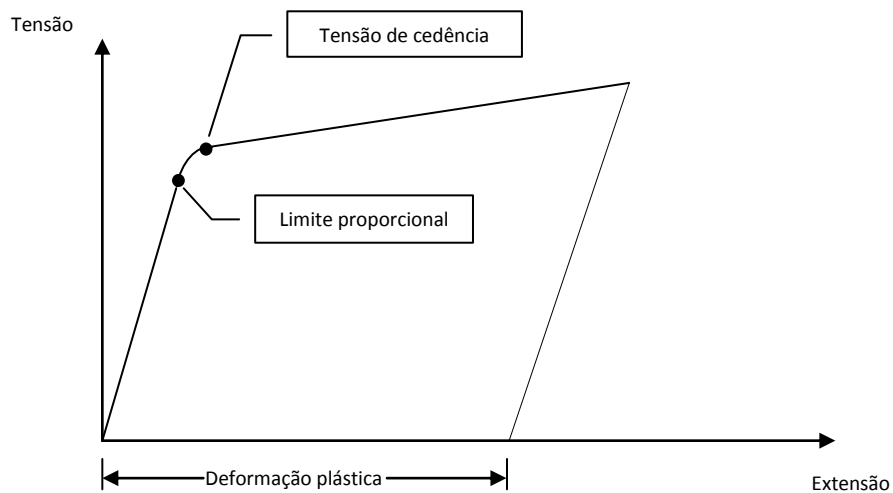


Figura 4.1: Curva tensão-extensão do material

Os exemplos apresentados nesta dissertação são analisados através do programa de elementos finitos ANSYS, incluindo os efeitos de não-linearidade de material. Para isso adoptou-se um modelo bi-linear para representar a curva tensão-deformação do material, tanto na tracção como na compressão. Este modelo, existente no programa ANSYS, é denominado *Bilinear Kinematic Hardening (BKIN)* e definido por dois segmentos de recta, onde o primeiro, de inclinação maior, representa o comportamento elástico e o segundo, com inclinação menor, representa o comportamento plástico. As constantes requeridas são o módulo de elasticidade (E) definido para material isotrópico, e o módulo tangente (MT).

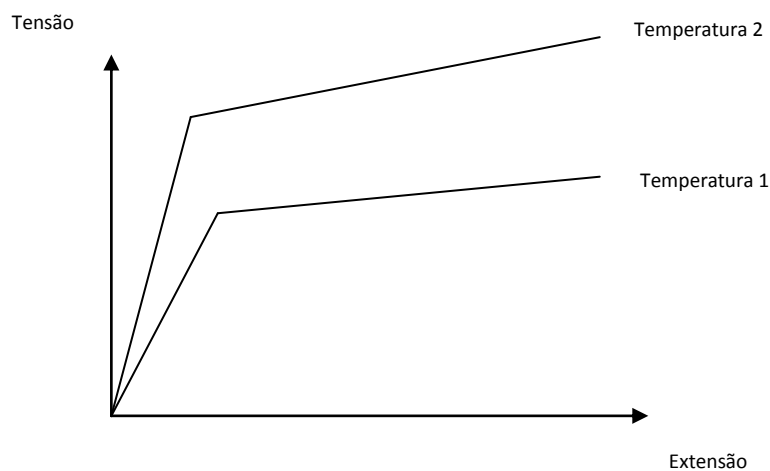


Figura 4.2: Modelo de material elasto-plástico bi-linear (BKIN)

4.2. Exemplo de Aplicação 1 - Simulação Numérica Elasto-Plástica da Janela de Neutrões do nTOF.

4.2.1. Introdução

O nTOF (*Neutron time-of-flight*) é um aparelho, que produz neutrões a partir de prótons. Insere-se no âmbito da física nuclear e não será explicado detalhadamente nesta dissertação. Contudo a análise da janela de saída de neutrões (figura 4.3) tem particular interesse do ponto de vista da Engenharia Mecânica.

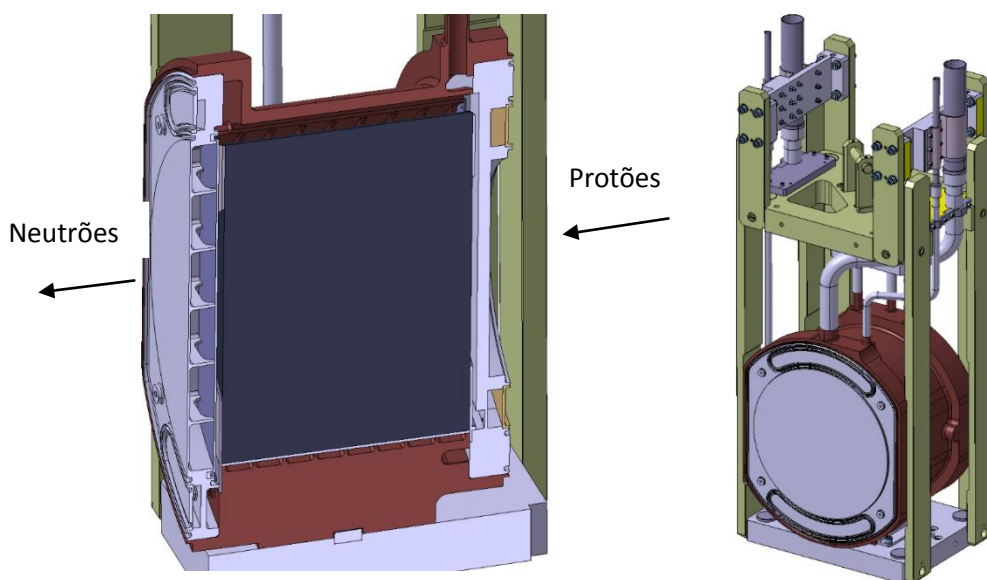


Figura 4.3: Modelo de CAD do *Neutron Time-of-Flight* (nTOF)

O nTOF é composto por um cilindro de chumbo de 600 mm de diâmetro e 400 mm de comprimento colocado dentro de um reservatório de alumínio. Este reservatório tem a função de suportar as superfícies do cilindro de chumbo de modo a evitar a fluência e a reter a água de arrefecimento, necessária para extrair os 2700 W de carga térmica depositada pelo feixe de prótons. De modo a respeitar as especificações funcionais, as janelas deverão ter uma espessura mínima possível, uma para a entrada do feixe de prótons e a outra para a saída de neutrões do reservatório.

Embora a estrutura do reservatório principal tenha sido projectada com uma espessura de parede elevada resultando em tensões mecânicas desprezíveis, a minimização da espessura das janelas, e em particular da janela de neutrões implicou um desenvolvimento detalhado e o projecto de acordo com os códigos de reservatórios sob pressão.

4.2.2. Requisitos funcionais

A altura de coluna de 10 m por si só cria uma pressão hidrostática superior a 0.5 bar, pressão acima da qual os regulamentos impõem a verificação de acordo com as Normas Europeias. O código de construção utilizado é o NF EN 13445: “*Recipients sous pression non soumis à la flamme*”, Septembre 2002, e em particular NF EN 13445 *Partie 8: “Exigences complémentaires pour les recipients sous pression en aluminium et alliages d’aluminium”*, Decembre 2004. De acordo com esta norma as tensões de referência de projecto são:

Grupo	Condições nominais de serviço	Condições de teste
22	$f_{ns} = \min ([R_{p0.2,t} / 1.5] \text{ or } [R_{m,20} / 2.4])$	$f_{test} = [R_{p0.2,20} / 1.05]$

Tabela 4.1: Tensões de projecto de acordo com NF EN 13445

Onde f_{ns} é a tensão nominal de serviço, $R_{p0.2,t}$ o limite de elasticidade a 0.2% e à temperatura t , $R_{m,20}$ é a resistência à tracção a 20C e $R_{p0.2,20}$ é o limite de elasticidade a 0.2% e a 20C.

Como o aumento da temperatura da água é desprezível e a pressão é a única carga aplicada, todas as tensões são consideradas tensões primárias e os seus valores máximos permitidos são:

Tensão equivalente permitida (critério de Tresca)	Condições nominais de serviço (MPa)	Condições de teste (MPa)
$S_{membrana} < f$	84	118
$S_{membrana} + \text{flexão} < 1.5*f$	124	178
$S_{membrana,local} < 1.5*f$	124	178

Tabela 4.2: Tensões máximas permitidas

A pressão de projecto deve ter em conta a altura de coluna de água entre o nTOF e estação de arrefecimento, as perdas de pressão na conduta de retorno e o pico de pressão induzido termicamente pelo impacto dos impulsos do feixe de protões. Também, a válvula de

segurança instalada no circuito deve ser calibrada para a pressão de projecto, e uma margem de erro é adicionada à pressão de projecto de modo a prevenir que a válvula se abra antes que a pressão de serviço máxima seja atingida. Deste modo temos:

- Pressão máxima da coluna de água: 1 bar
- Pico de pressão: 285 mbar
- Perda de pressão na conduta de retorno: 155 mbar
- 10% de margem de erro para a válvula de segurança (regulada para 1.6 bar)

A pressão de projecto é então 1.6 bar, que corresponde a uma pressão máxima de serviço de 1.44 bar. De acordo com a referência (NF EN 13445), o projecto deve ser testado com uma pressão hidrostática de pelo menos 1.43 vezes a pressão de projecto (2.3 bar).

O ácido nítrico é um dos produtos que pode ser criado na atmosfera que rodeia o reservatório de pressão, se este estiver a operar em condições atmosféricas não controladas. Embora seja difícil quantificar a produção de ácido nítrico e os possíveis danos por Corrosão Sob Tensão (CST), em particular nas membranas finas sujeitas a tensões no lado atmosférico. De modo a reduzir o risco do CST no lado atmosférico do reservatório de pressão, as tensões não deverão ser superiores a 50% do limite de elasticidade.

Outro requisito funcional, aparte da resistência mecânica, que afecta a performance da janela de neutrões é a sua deflexão devido à pressão, que não deverá ser superior a 2 mm.

4.2.3. Propriedades do Material

O material utilizado é a liga de alumínio-magnésio 5083 H111 que tem as seguintes propriedades mínimas.

Material	Módulo de Elasticidade E [GPa]	Tensão de Cedência Rp0.2[MPa]	Tensão de Ruptura Rm [MPa]	Extensão [%]
Alumínio 5083 H111	70	125	275	>16

Tabela 4.3: Propriedades do alumínio-magnésio 5083 H111

4.2.4. Modelo de Elementos finitos

A figura 4.4 representa a vista em corte da janela de neutrões onde é possível ver os reforços. A janela consiste numa membrana de 3 mm de espessura, com 600 mm de diâmetro, com reforços de 5.5 mm de espessura espaçados por 100 mm. Os raios de concordância têm 5 mm e permitem reduzir a concentração de tensões. As aberturas nos reforços permitem a circulação da água na direcção vertical. A estrutura em torno do diâmetro efectivo de 600 mm tem canais para distribuir a água no circuito. De modo a evitar a retenção de bolhas de ar, os reforços horizontais não são perpendiculares em relação à membrana mas têm um ângulo pequeno. A água será introduzida através de furos injectores que existem na superfície lateral de modo a preencher todo o espaço que existe entre a janela e a placa de separação, assim como o volume que vai servir de arrefecimento à superfície do chumbo.

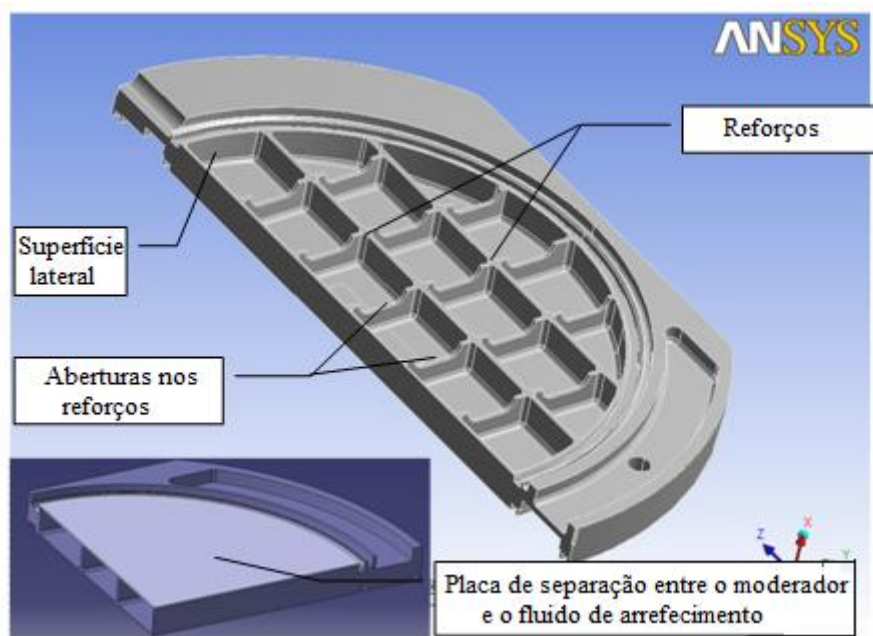


Figura 4.4: Design da janela de neutrões

Uma vez que a placa de separação (figura 4.4) não está rigidamente ligada aos reforços, não contribui significativamente para a rigidez da janela. Os cálculos apresentados foram, deste modo conservativos, ignorando o efeito da membrana interior.

A análise da janela de neutrões foi efectuada com o recurso ao método dos elementos finitos e o programa ANSYS. A pressão de 1.6 bar foi aplicada na totalidade da superfície exterior da janela. As condições fronteira consistem no constrangimento total dos graus de liberdade na periferia, como mostrado na figura 4.5.

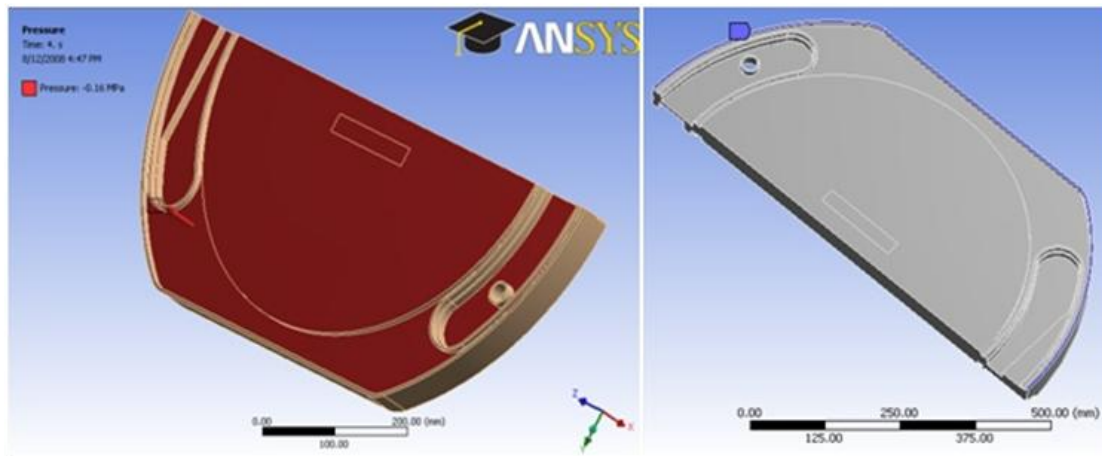


Figura 4.5: Superfície onde a pressão é aplicada (esquerda). Elementos com todos os graus de liberdade bloqueados na região periférica (direita).

4.2.5. Resultados

Os resultados obtidos da primeira análise linear elástica mostram um deslocamento máximo de 1.9 mm, como pode ser visto na figura 4.6. Embora este valor esteja muito próximo do valor máximo especificado, é o resultado correspondente à pressão de projecto de 1.6 bar, que é superior à pressão real de serviço.

Da análise de tensões resulta uma tensão máxima equivalente de 183 MPa, que ocorre nalguns pontos dos reforços horizontais, onde a redução de altura foi introduzida de modo a permitir a circulação vertical de água. Como se pode ver pelas figuras 4.7 e 4.8, as tensões globais estão abaixo do limite de 84 MPa para tensões de membrana e 124 MPa para a tensão total.

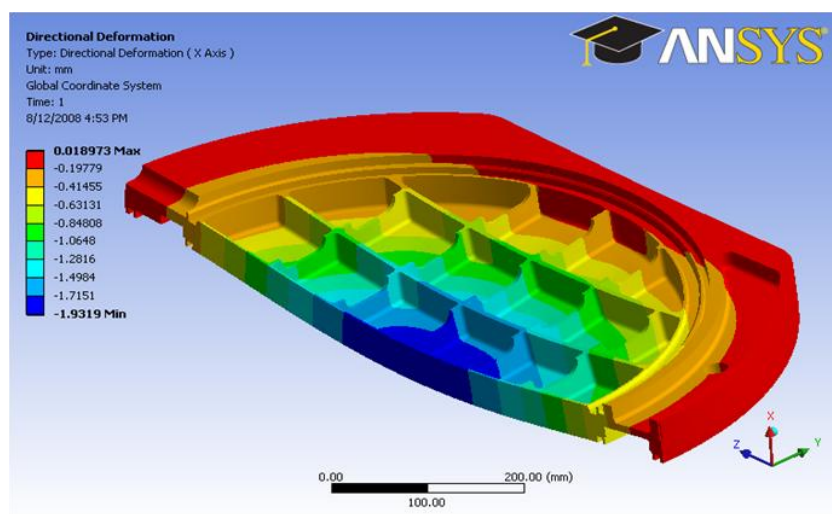


Figura 4.6: Deslocamentos na janela de neutrões.

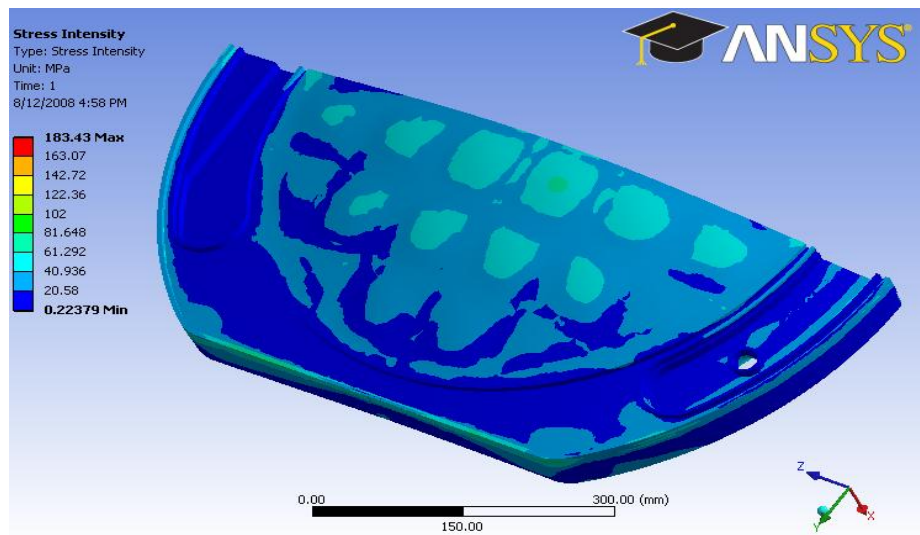


Figura 4.7: Tensões resultantes da análise linear elástica.

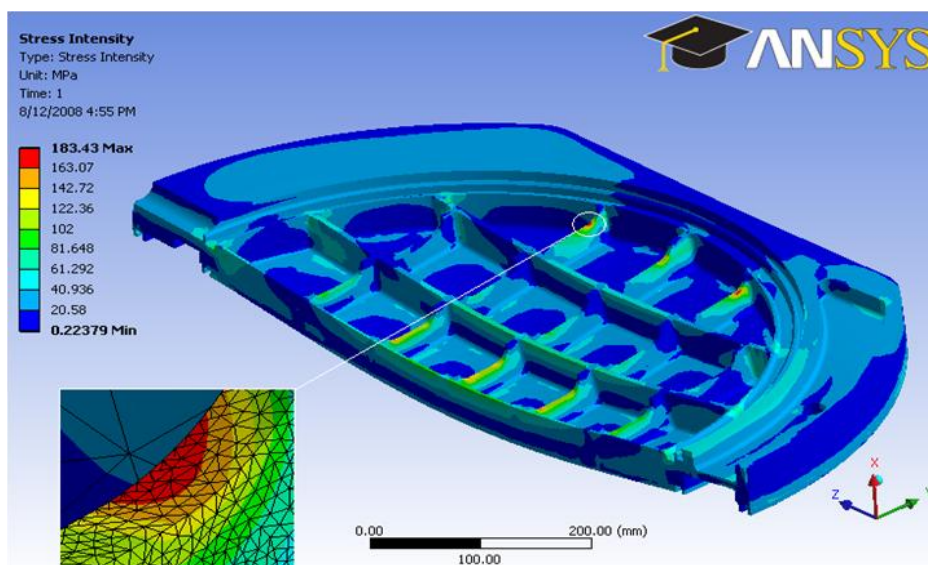


Figura 4.8: Ponto de tensão máxima.

Apesar o que foi dito, o valor de tensões locais de 183 MPa é superior ao limite de 124 MPa imposto pelo código EN 13445. Como se trata de uma região muito localizada e sendo o AW 5083 H111 um material dúctil (extensão mínima 16%), é razoável assumir que a pequena deformação plástica que deverá ocorrer durante a aplicação da pressão de teste vá redistribuir as tensões. Os seguintes ciclos de carregamento em condições de serviço serão então em regime totalmente elástico. De modo a validar esta assunção uma análise elasto-plástica foi feita. Foi implementado um modelo de material bilinear com o módulo de Young de 70 GPa, uma tensão de cedência de 125 MPa, e um módulo tangente conservativo de 934 MPa (figura 4.9)

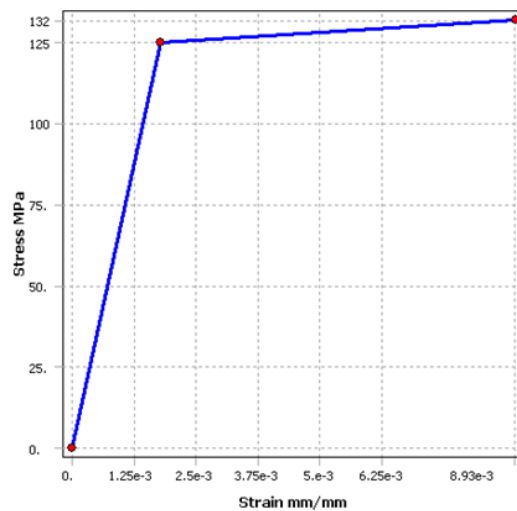


Figura 4.9: Modelo elasto-plástico bilinear.

A análise foi efectuada em três passos. Começou-se pela aplicação da pressão de teste de 2.3 bar. De seguida removeu-se esta pressão no segundo passo e por último foi aplicada a pressão de projecto de 1.6 bar.

As figuras seguintes apresentam os resultados no fim do primeiro passo à pressão de 2.3 bar. A janela plastifica localmente nos pontos com concentração de tensões atingindo uma plastificação de apenas 0.4%. Porque o MT utilizado é inferior ao valor que resultaria de uma curva real tensão-extensão, este valor é conservativo. Nos pontos de maior extensão, os resultados apresentam tensões de 147 MPa, embora, este valor seja uma aproximação grosseira devido á aproximação do comportamento do material na ocorrência da plastificação.

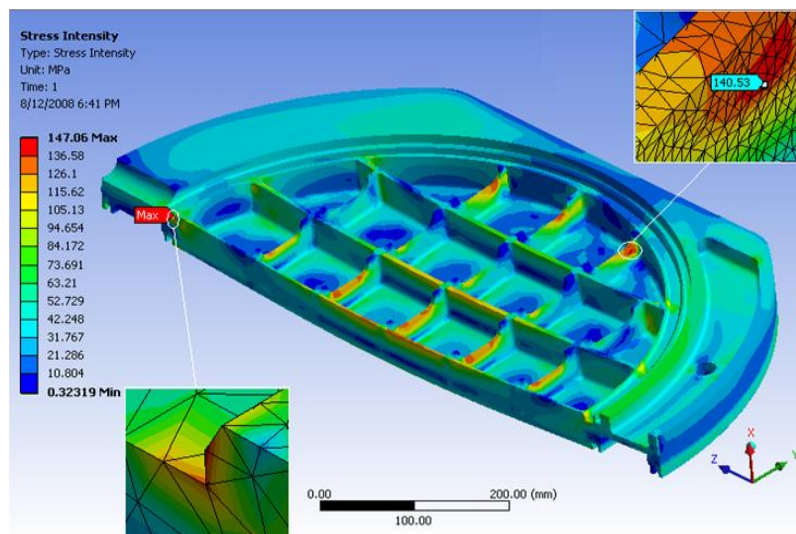


Figura 4.10: Tensão máxima no modelo elasto-plástico à pressão de teste.

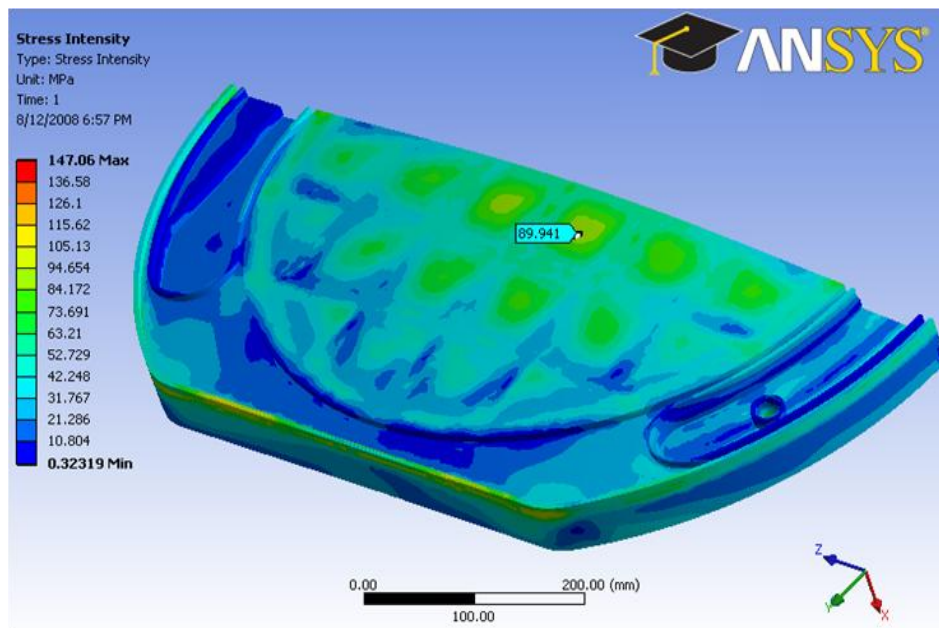


Figura 4.11: Tensão máxima na membrana é 90 MPa à pressão de teste.

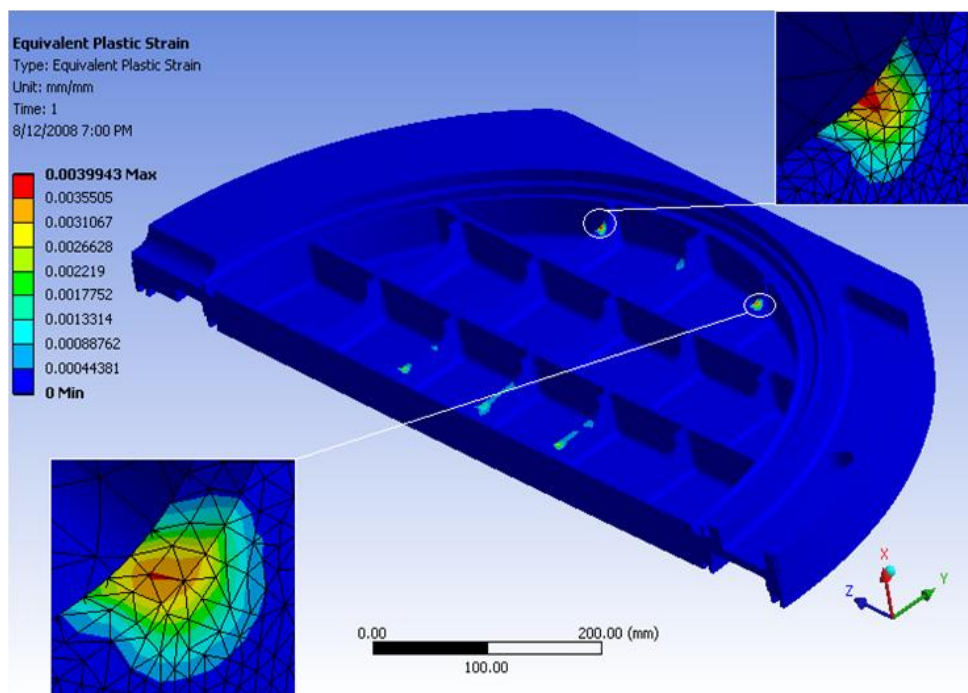


Figura 4.12: Máxima deformação plástica equivalente (0.4%).

As tensões totais de membrana atingem o máximo de 90 MPa, que se encontram dentro do domínio elástico e bastante abaixo dos 178 MPa permitidos pelo EN 13445. O deslocamento máximo calculado com a pressão de 2.3 bar é 2.8 mm.

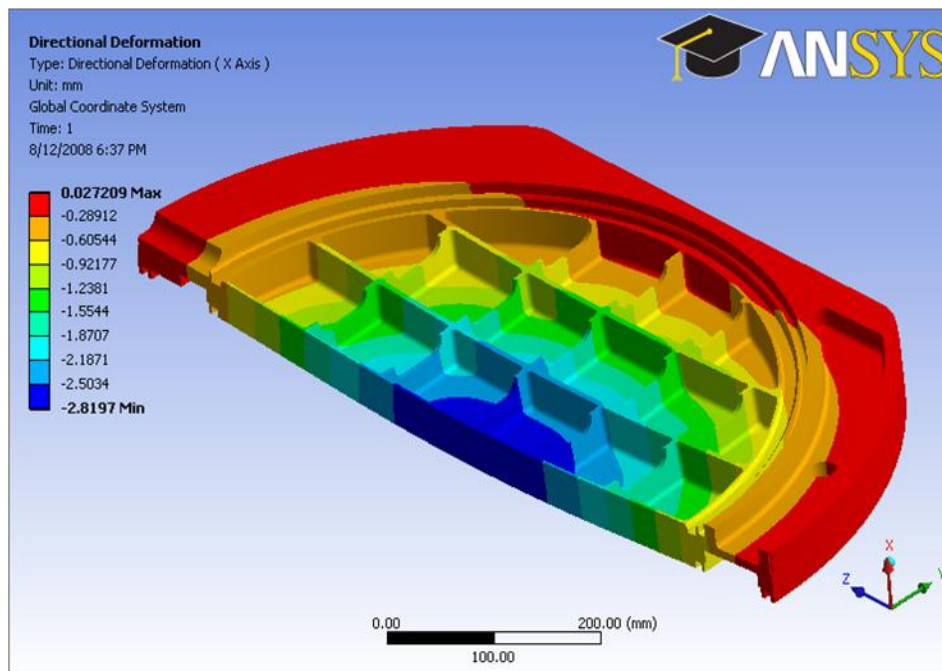


Figura 4.13: Deslocamento máximo (2.8 mm) à pressão de teste.

Após a remoção da pressão de teste, foi aplicada a pressão de projecto de 1.6 bar. Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16. A tensão máxima é agora 106 MPa, que indica que toda a estrutura funcionará abaixo do limite de elasticidade, e a tensão máxima total de membrana é 60 MPa. O deslocamento máximo obtido para as condições de projecto é agora 1.97mm que corresponde a deslocamento de 1.77 mm para a pressão de serviço de 1.44 bar.

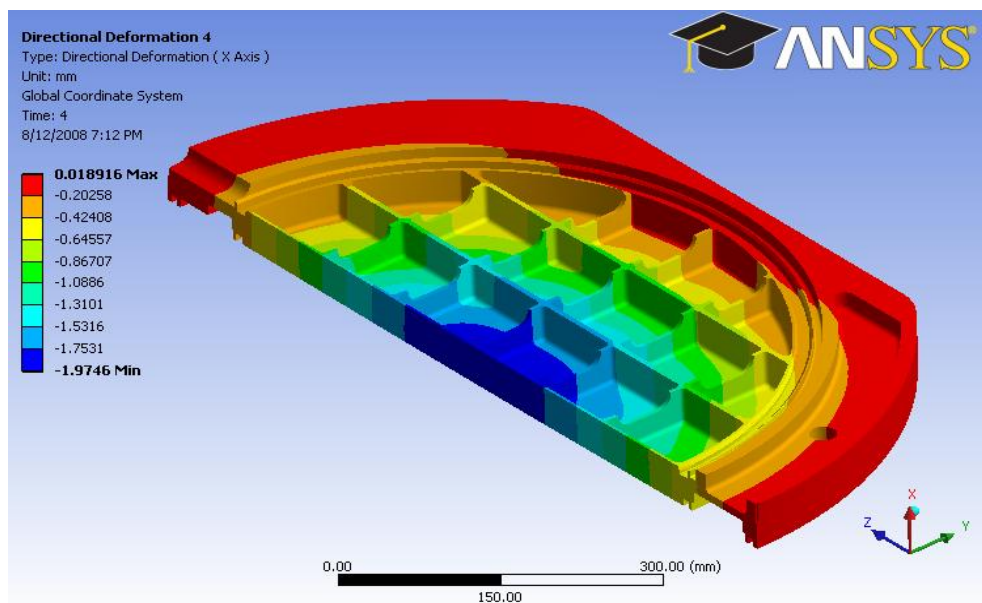


Figura 4.14: Deslocamento máximo (1.8mm) à pressão de projecto.

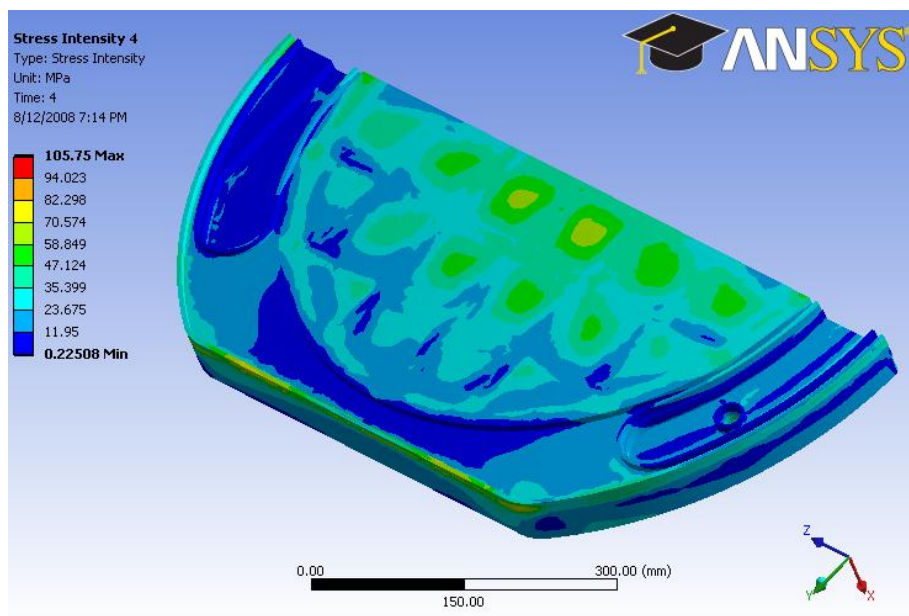


Figura 4.15: Tensão máxima (61 MPa) na membrana de 3mm.

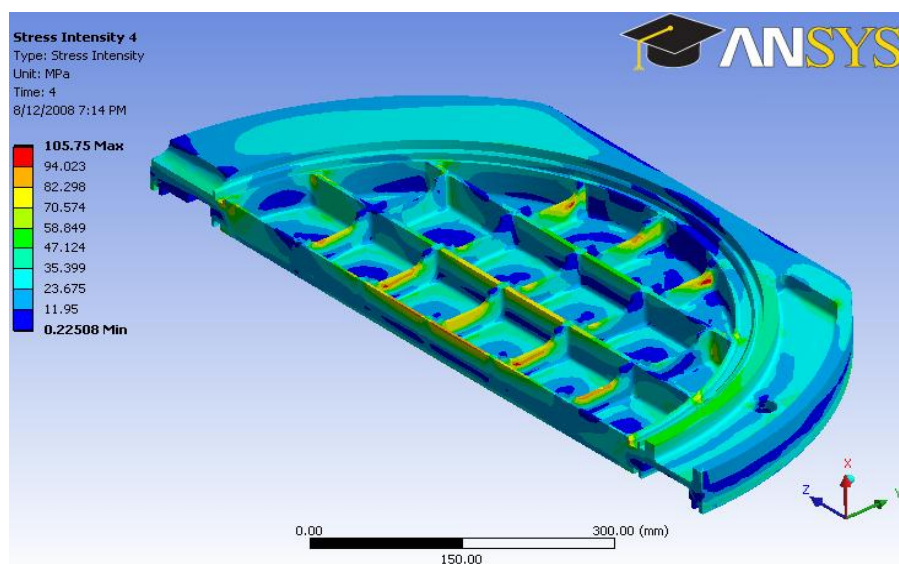


Figura 4.16: Tensão máxima local de membrana (106 MPa) à pressão de projecto.

Em relação à eventual falha por CST nas superfícies expostas à atmosfera, observa-se que as zonas mais críticas são as células em membrana no centro da janela. Nesta área, não só a espessura é pequena (3mm) mas também as tensões de tracção são máximas. A figura 4.17 mostra o caminho utilizado para fazer o gráfico da figura 4.18 que representa a variação da tensão normal na direcção Z. Deste gráfico pode-se concluir que a tensão máxima de tracção é 60 MPa, inferior ao limite de 50% de 125 MPa do limite de elasticidade, de acordo com as recomendações para evitar a ocorrência de falha por CST.

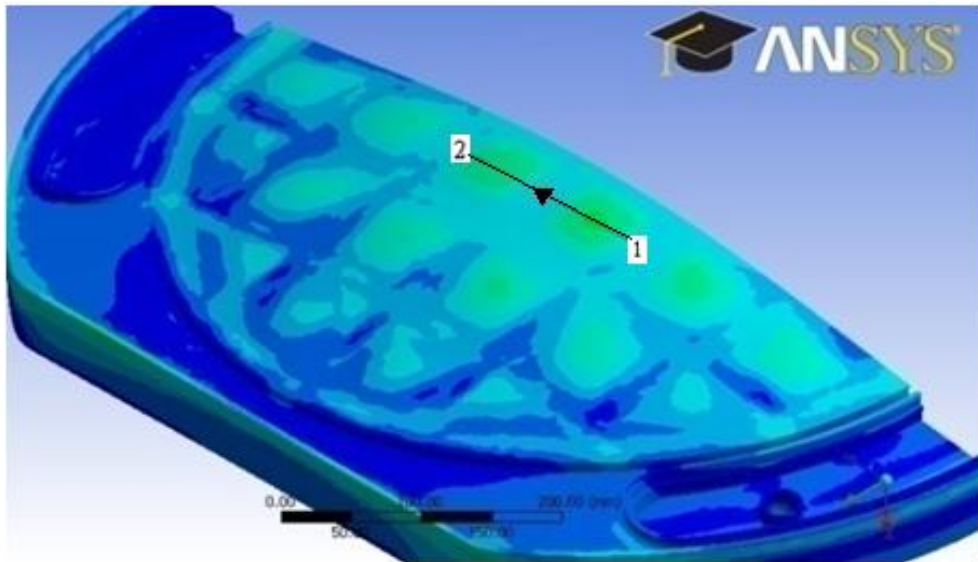


Figura 4.17: Caminho para o plot das tensões máximas de tensão no lado atmosférico da janela.

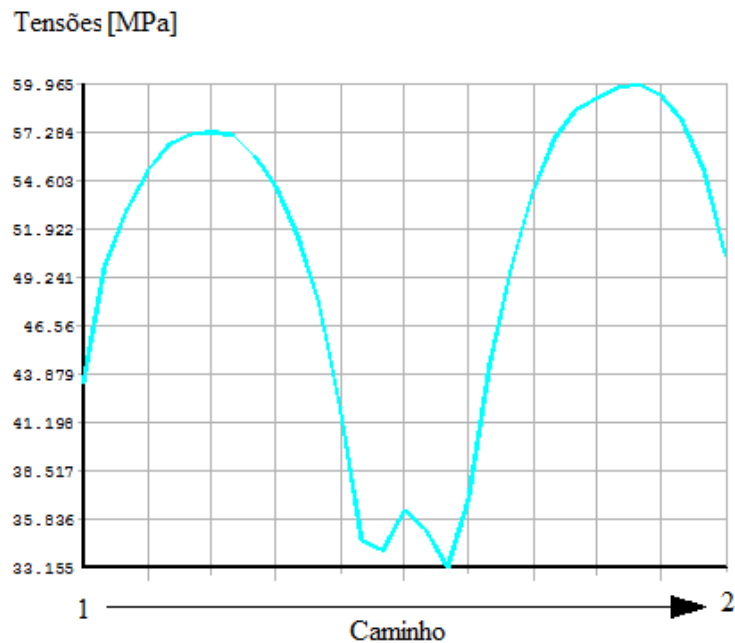


Figura 4.18: Tensões ao longo do caminho da figura 3-17 (máximo 60 MPa)

4.2.6. Conclusões

Os resultados obtidos da análise mecânica da janela de nêutrons permitiram a verificação deste componente tendo em conta os requerimentos funcionais e de segurança. Embora uma pequena deformação plástica seja prevista durante a aplicação da pressão de teste, uma análise elasto-plástica mostrou que a plastificação é muito pequena. Todas as deformações subsequentes devido aos ciclos sobre a pressão de serviço estarão dentro do limite de

elasticidade e os resultados são compatíveis com os regulamentos de construção de reservatórios sob pressão. A espessura da membrana é também compatível com as recomendações em relação às tensões de tracção prevenindo a ocorrência da CST neste componente. Como todas as outras partes do vaso de pressão, incluindo soldaduras, não tinham requerimentos em termos de espessuras, foram largamente sobredimensionados e são assim considerados seguros.

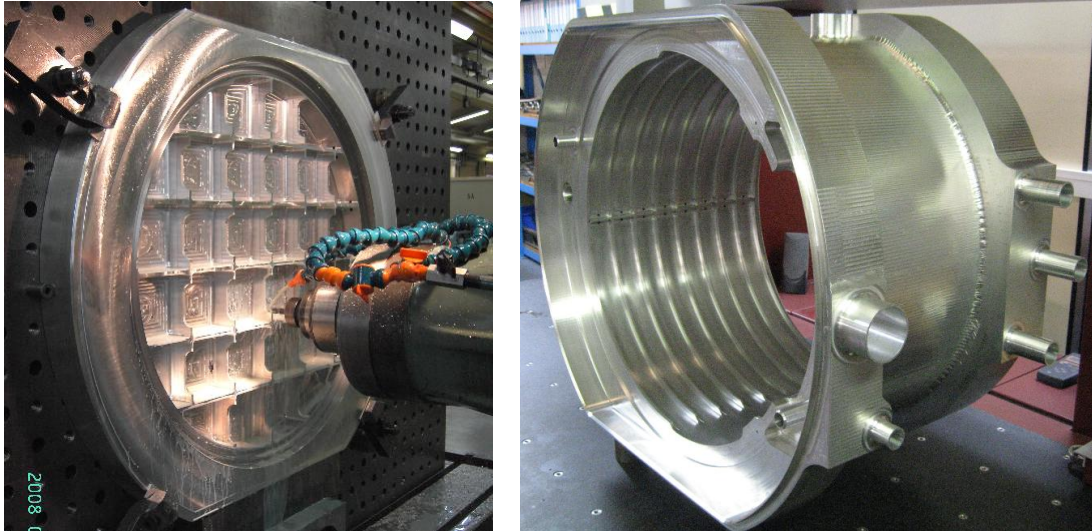


Figura 4.19: Janela de neutrões em fabrico (esquerda). Reservatório fabricado (direita).

4.3. Exemplo de Aplicação 2 - Simulação da brasagem do Radio Frequency Quadrupole (RFQ).

O *Linac4* (*Linear accelerator 4*) é a proposta para substituir o actual acelerador de prótons no CERN (*Linac2*). Com o uso de uma injeção de energia de 160 MeV (Megaelectron-Volt, unidade de energia na física nuclear) em vez de 50 MeV, espera-se que o *Linac4* aumente para o dobro a intensidade do feixe. Trata-se de uma máquina de baixo ciclo (2Hz), que fornece impulsos de feixes de H^- de 0.4 ms com uma média de corrente por impulso de 40mA.

O *Linac4* (figura 4.20) é composto por uma fonte de iões, um *Radio Frequency Quadrupole* (RFQ) que irá capturar o feixe de iões e acelerar até à energia de 3 MeV, um *Alvarez Drift Tube Linac* (DTL) que por sua vez irá acelerar até à energia de 50 MeV, um *Cell-Coupled Drift Tube Linac* (CCDTL) que irá acelerar até aos 100 MeV e por último, um *Pi-mode structure* (PIMS), tendo um comprimento total de 86 metros, que irá acelerar o feixe até aos 160 MeV.

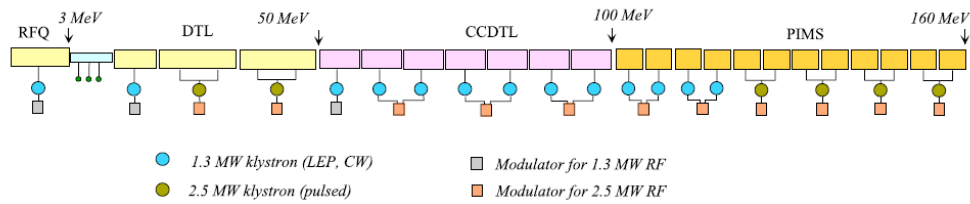


Figura 4.20: Componentes do Linac4.

Todos os componentes são dispositivos que se enquadram no âmbito da física nuclear, fora do contexto da presente tese e por isso não serão explicados detalhadamente. Uma breve descrição será feita do ponto de vista da engenharia mecânica para o RFQ na secção 4.3.1. e para o PIMS na secção 4.4.

4.3.1. Introdução

Depois da injeção de iões, o *Radio Frequency Quadrupole* (RFQ) vai capturar o feixe e acelerá-lo até à energia de 3 MeV. O RFQ tem 6 m de comprimento e é feito a partir de três segmentos acoplados entre si. Este acoplamento é feito através de coroas circulares de aço inoxidável que vão ser ligadas a cada segmento por brasagem. Os segmentos do RFQ são produzidos em cobre.

Para determinar as tensões residuais que poderão advir deste processo, uma simulação de elementos finitos foi feita com o programa de elementos finitos Ansys.

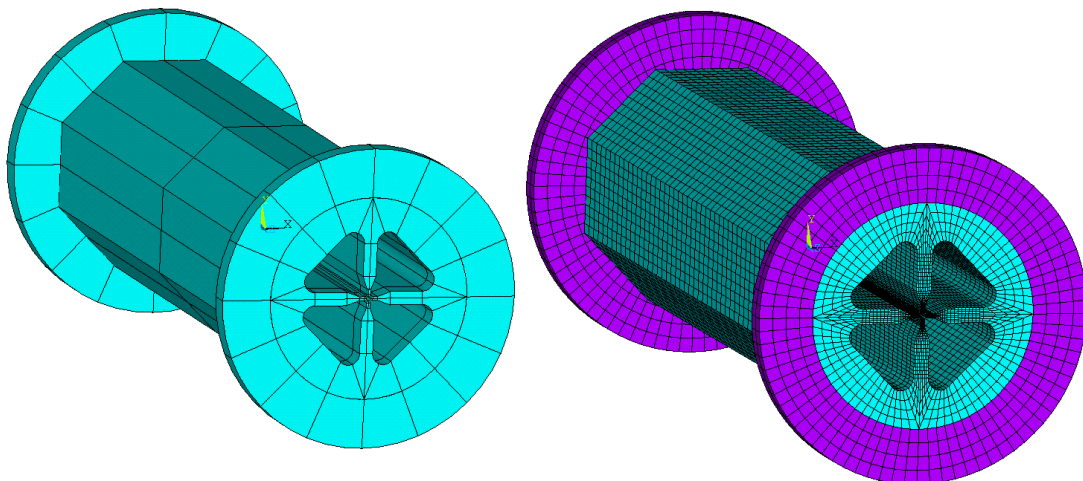


Figura 4.21: Geometria e malha de elementos finitos do RFQ.

A simulação foi feita em duas etapas. Numa primeira etapa foi simulado o processo de aquecimento das peças até 780 C. Esta simulação foi feita separadamente para cada peça, tendo como objectivo a análise da expansão térmica resultante da exposição à alta temperatura. A segunda etapa foi a simulação do processo de arrefecimento de 780 C até à temperatura ambiente. Para isso, considerou-se agora que as duas peças estavam perfeitamente ligadas à temperatura de 780 C e foram arrefecidas até à temperatura ambiente.

4.3.2. Requisitos funcionais

O processo de brasagem ocorre à temperatura de 780 C e, devido à diferença entre o coeficiente de expansão térmica entre os materiais, a ocorrência de concentração de tensões permanentes ou mesmo plastificação do material é esperada, quando estes voltarem à temperatura ambiente. No final do processo de brasagem, quando ambas as peças se encontram à temperatura ambiente, a posição do centro do RFQ não deverá exceder 20µm de deslocamento em relação à posição inicial, antes do processo de brasagem.

4.3.3. *Propriedades do Material Para a Simulação do Processo de Aquecimento*

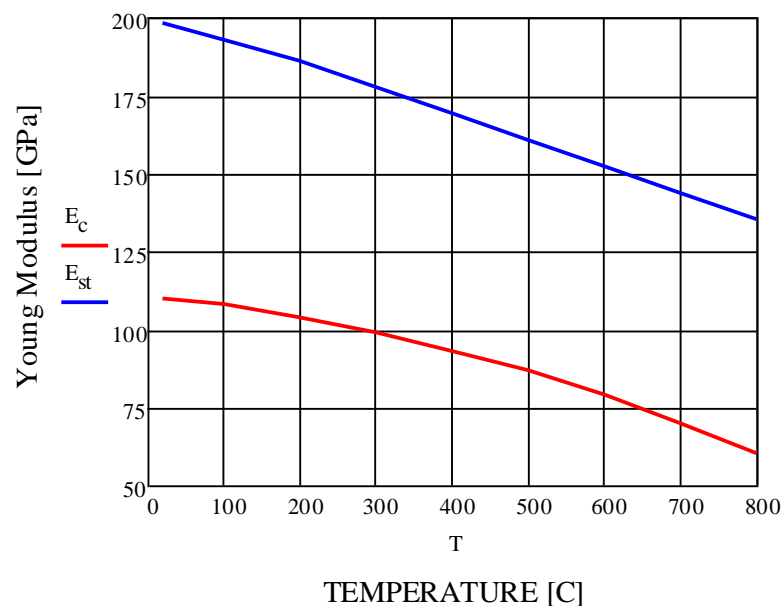


Figura 4.22: Módulo de Young em função da temperatura para o cobre (traço a vermelho) e para o Aço Inoxidável (traço a azul).

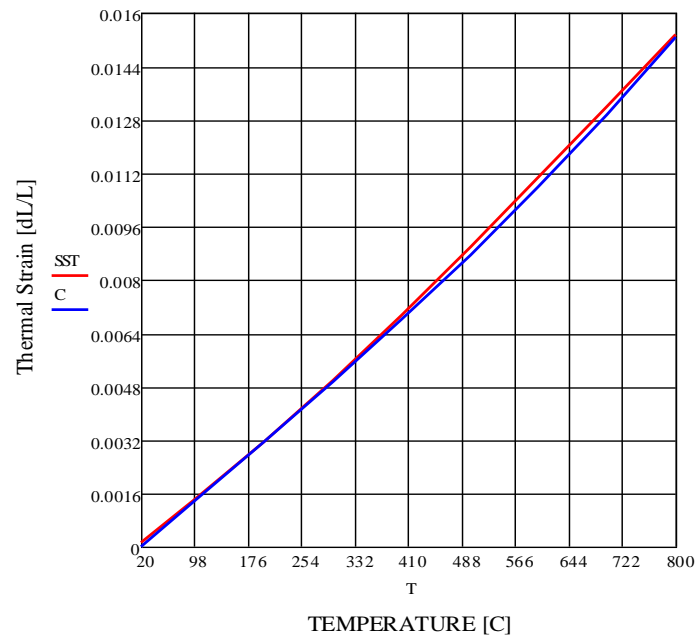


Figura 4.23: Expansão térmica do cobre (traço a azul) e do aço inoxidável (traço a vermelho).

4.3.4. Modelo de Elementos Finitos - Simulação do processo de aquecimento

4.3.4.1. Geometria, elementos e condições fronteira

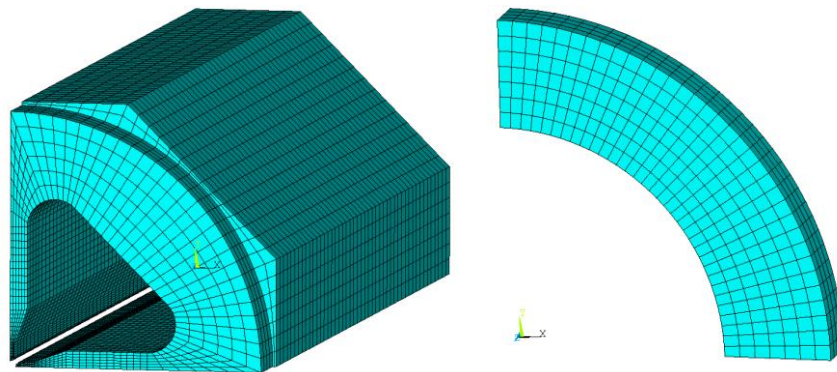


Figura 4.24: Geometria e malha de elementos finitos do RFQ para a simulação do processo de aquecimento.

A geometria foi modelada com elementos do tipo SOLID45. Este elemento é definido por 8 nós com 3 graus de liberdade em cada nó: translação nas direções X , Y e Z . Como capacidades especiais, este elemento permite simulações com plasticidade, fluência, grandes deslocamentos e grandes deformações entre outras.

A única carga aplicada no modelo foi a temperatura. Considerou-se uma temperatura inicial igual a 20 C e final de 780 C.

4.3.4.2. Resultados

O deslocamento, devido à expansão térmica, das superfícies que vão ser brasadas é aproximadamente igual a 2.129 mm para o corpo em cobre (figura 4.25) e 2.148 mm para a coroa circular de aço inoxidável (figura 4.26). O espaço inicial entre as peças aumentou cerca de 0.019 mm que, somados aos 0.005 mm iniciais, se traduz em cerca de 0.024 mm. O objectivo desta primeira análise era por um lado, verificar que depois do processo de aquecimento ainda haveria o espaço entre as peças, necessário para a brasagem, e por outro verificar o valor da expansão térmica (0.0481 mm) no centro da peça em cobre. Este valor vai ser mais tarde comparado com a regressão térmica de modo a se verificar o quanto o centro da peça se vai deformar devido à brasagem com a coroa de aço inoxidável.

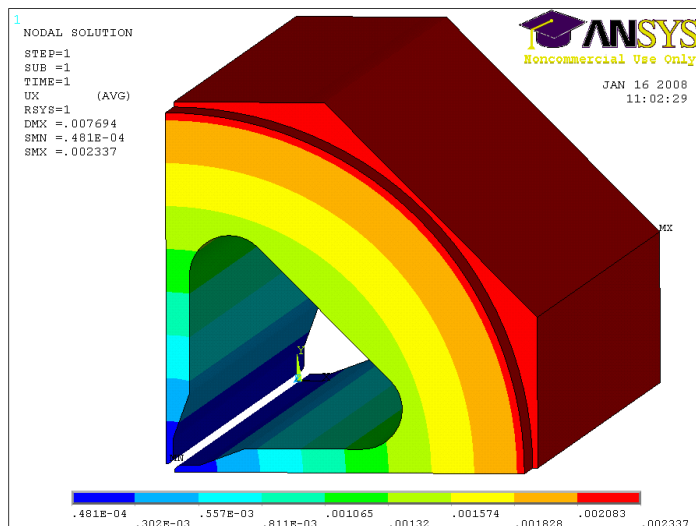


Figura 4.25: Expansão térmica da peça em cobre.

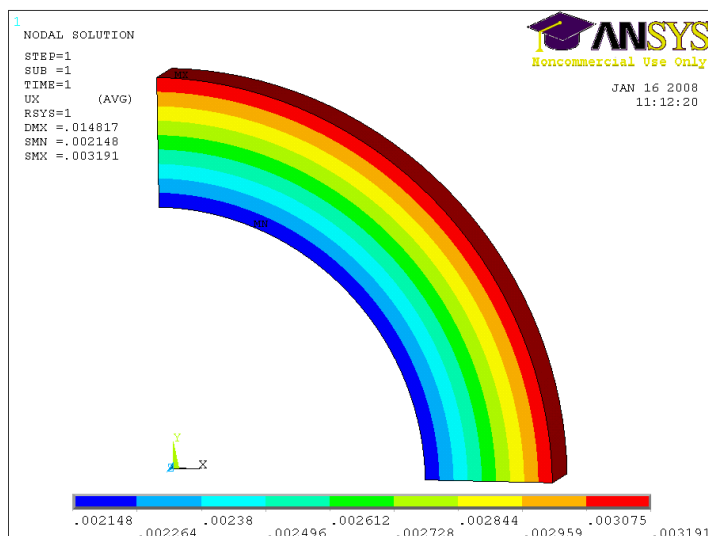


Figura 4.26: Expansão térmica da peça em aço inoxidável.

4.3.5. Propriedades do Material Para o Processo de Arrefecimento

O valor da tensão de cedência do cobre sofre alterações se a peça for aquecida até altas temperaturas. Na figura 4.27 podemos ver esquematicamente esse fenómeno. No processo de arrefecimento o limite de elasticidade do cobre é substancialmente mais baixo comparado com o seu valor inicial, antes do aquecimento até aos 780C.

Quando o cobre é aquecido acima da temperatura de recristalização, sofre crescimento de grão á custa de grãos mais pequenos. Quando a estrutura arrefece, podem-se formar discordâncias e os grãos podem ter que mudar de direcção de movimentação quando encontrarem outro grão, logo o contorno de grão torna-se um obstáculo. A desordem de um contorno de grão resultará na descontinuidade dos planos de escorregamento de um grão para o outro e por isso reduzir o retorno elástico.

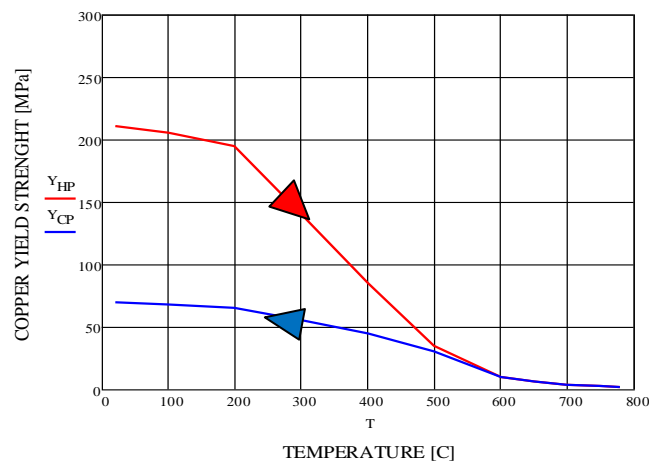


Figura 4.27: Alteração da tensão de cedência do cobre após exposição a alta temperatura.

O retorno elástico do aço inoxidável mantém-se para temperaturas até aos 1050 C, como está representado na figura 4.28.

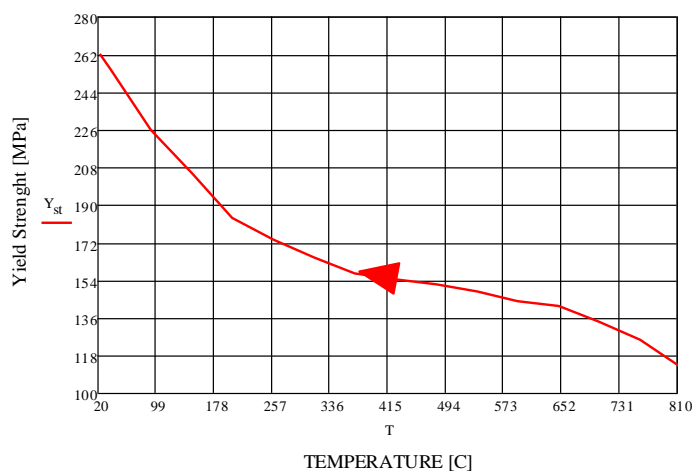


Figura 4.28: Tensão de cedência do aço inoxidável para o processo de arrefecimento.

4.3.6. Modelo de Elementos Finitos - Simulação Para o Processo de Arrefecimento

4.3.6.1. Geometria, elementos e condições fronteira

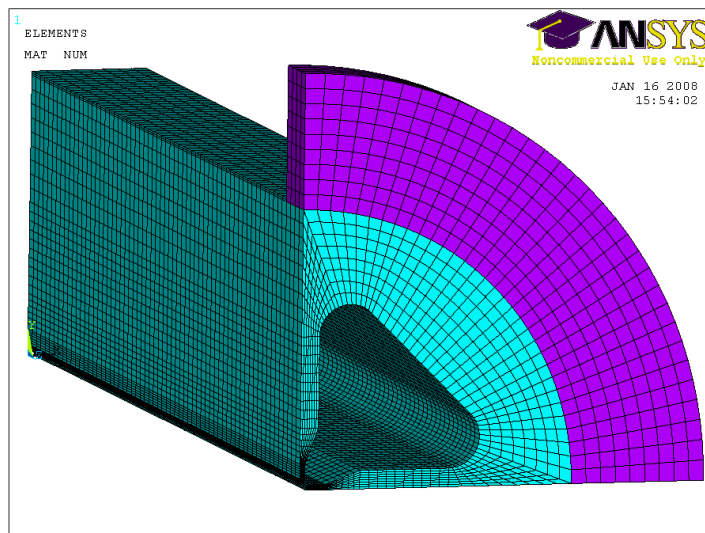


Figura 4.29: Geometria e malha de elementos finitos do RQF para a simulação do processo de arrefecimento.

No processo de arrefecimento, para efeitos de simplificação, considerou-se que as superfícies que iriam ser brasadas estão em contacto perfeito. Ambas as peças foram modeladas com elementos do tipo SOLID45.

O objectivo desta simulação é verificar que a posição do centro da peça em cobre regressa à posição inicial ou que não difere mais do que $20\mu m$ desta. Neste caso os efeitos de uma possível ocorrência de plasticidade podem ser importantes.

No processo de arrefecimento utilizou-se um modelo de material elasto-plástico *Bilinear Kinematic Hardening* – BKIN. A opção de BKIN assume que a tensão total é igual ao dobro da tensão de cedência, de modo a que o efeito de Bauschinger é incluído. Este efeito refere-se à propriedade dos materiais onde as características de tensão-extensão alteram-se como resulta de uma distribuição de tensões microscópica do material.

As figuras seguintes mostram o gráfico das curvas de tensão-extensão do cobre (figura 4.30) e do aço inoxidável (figura 4.31) para o modelo bilinear usado.

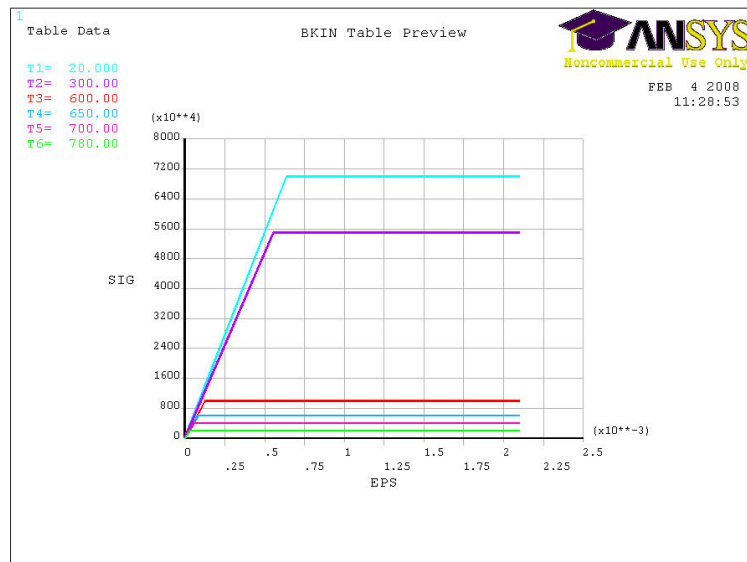


Figura 4.30: Modelo bi-linear elasto-plástico do cobre.

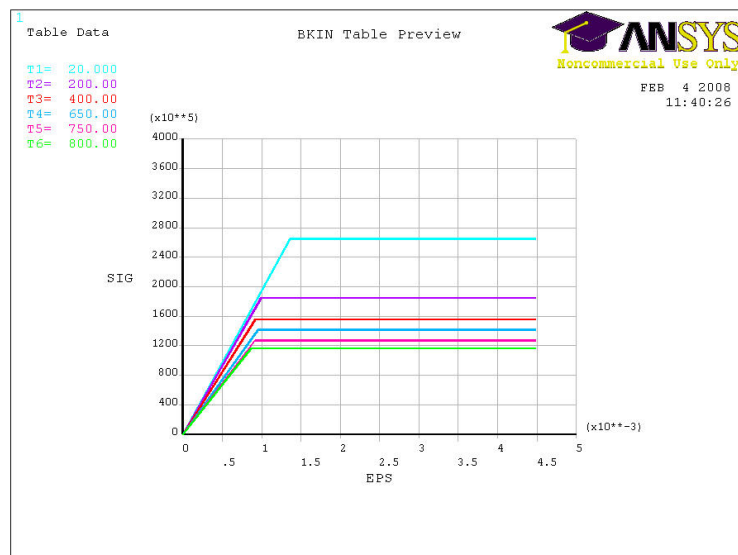


Figura 4.31: Modelo bi-linear elasto-plástico do aço inoxidável.

Para definir este modelo é necessário introduzir a dependência da tensão de cedência da temperatura, e o MT. Este pode ser obtido aproximadamente pelo quociente entre a tensão de ruptura menos a tensão de cedência, a dividir pela extensão de ruptura. Devido à falta de dados precisos em relação à extensão dos materiais em função da temperatura, optou-se por assumir um MT baixo, próximo de zero, e desta forma tornar o cálculo do problema conservativo.

4.3.6.2. Resultados

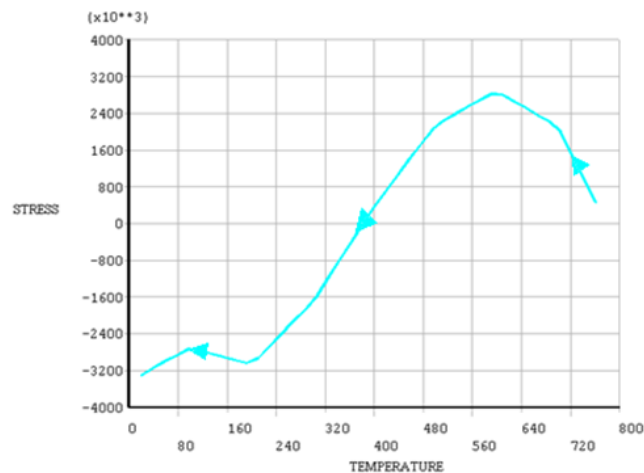


Figura 4.32: Evolução da tensão máxima durante o processo de arrefecimento de 780 C até 20 C.

Como podemos ver pelo gráfico da figura 4.32, a tensão máxima durante o processo de arrefecimento ocorre à temperatura de ~600C, como previsto, devido a ser a zona onde a diferença entre o coeficiente de expansão térmica dos materiais é maior. A plasticidade pode ocorrer entre as temperaturas de 780C e 600C, devido ao baixo limite de elasticidade do cobre, como foi visto no gráfico da figura 4.27.

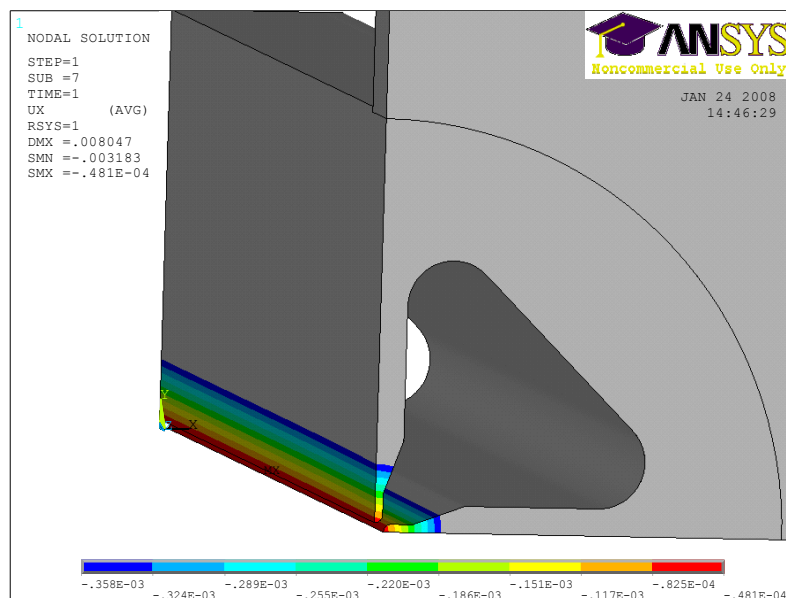


Figura 4.33: Regressão térmica no centro da peça de cobre devido ao arrefecimento das peças.

À temperatura ambiente, o deslocamento radial no centro da peça em cobre é aproximadamente igual a 0.0481 mm, em sentido negativo.

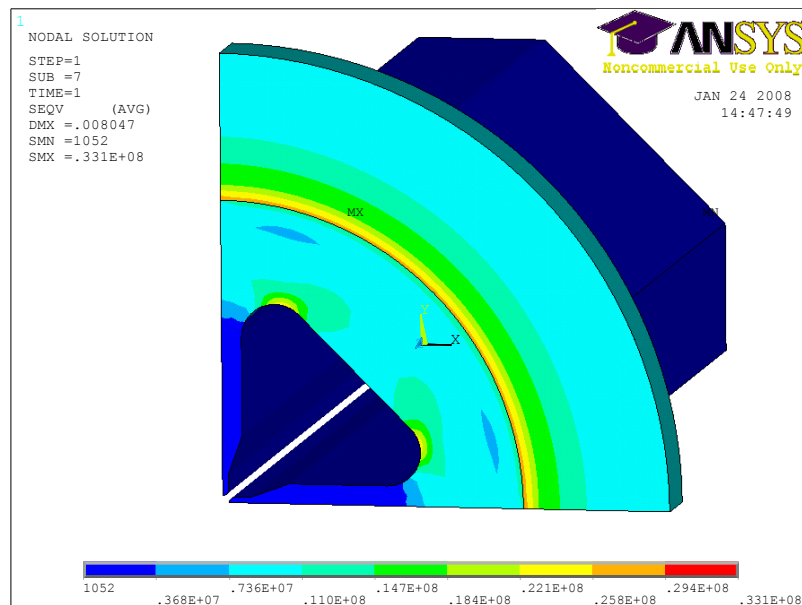


Figura 4.34: Tensão permanente à temperatura ambiente

Na figura 4.34, podemos ver a concentração de tensões à temperatura ambiente. A tensão máxima ocorre na zona onde as peças foram brasadas e chega aos 33.1 MPa.

Como se pode ver pela figura 4.35, ocorreu plastificação durante o processo de arrefecimento, mas a posição final do centro da peça está dentro da tolerância de 20 μ m. Se compararmos os resultados da expansão e regressão térmicas para os processos de aquecimento e arrefecimento respectivamente, pode-se ver que é exactamente o mesmo mas com sentidos opostos e igual a 0.0481 mm.

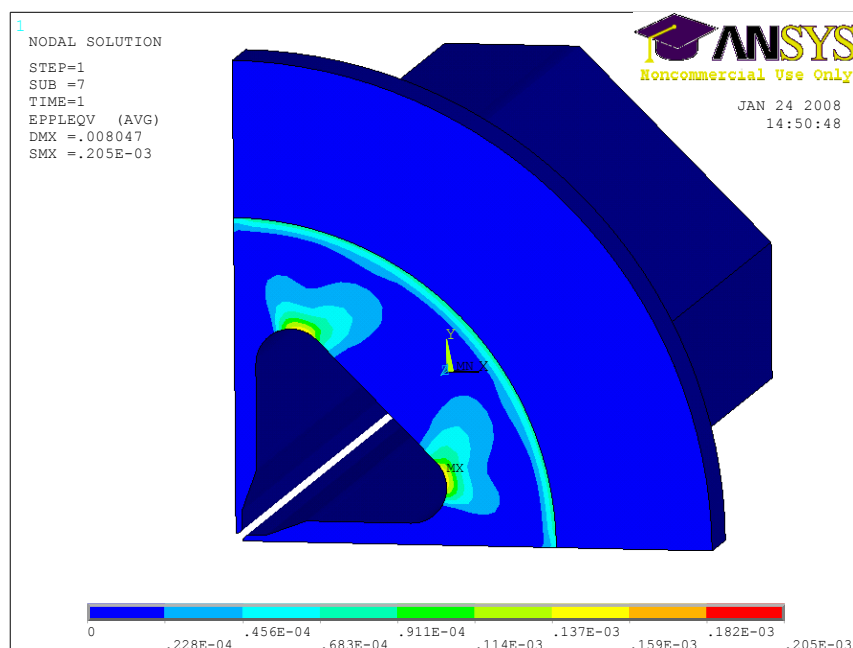


Figura 4.35: Deformação plástica no fim do processo de arrefecimento.

Como conclusão, verificou-se que ocorre plastificação durante o processo de arrefecimento das peças brasadas, não afectando a posição inicial e final da peça em cobre. Na figura 4.36 podemos ver uma fotografia das peças já unidas pelo processo de brasagem.

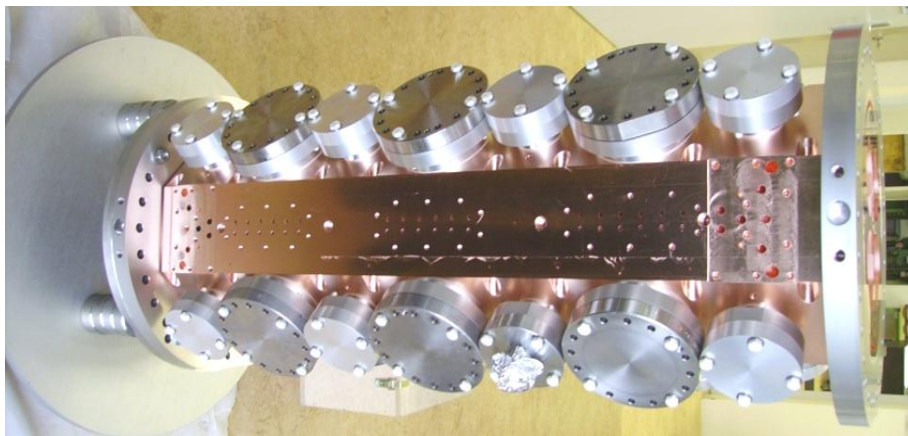


Figura 4.36: Fotografia das peças após a brasagem

4.4. Exemplo de Aplicação 3: Dimensionamento dos Canais de Arrefecimento do Pi-mode *Structure* (PIMS).

Pretende-se com este exemplo, dimensionar os canais de arrefecimento do PIMS e sua optimização estrutural via algoritmos genéticos.

O enquadramento geral deste exemplo e uma breve introdução ao Linac4, foram apresentados na secção 4.3.

Fizeram-se várias análises de elementos finitos preliminares para determinar a configuração geométrica dos canais de arrefecimento. Estas análises preliminares revelaram que a zona que seria mais afectada pelo aumento de temperatura e consequentemente pela expansão térmica do material, seria a extremidade do cone no centro da peça. Nestas mesmas análises verificou-se que as diferenças de temperatura na estrutura originavam tensões na ordem dos 50 MPa. A tensão de cedência para o Cobre utilizado tem o valor mínimo de 40 MPa o que levantou a hipótese de se ter que utilizar um Cobre com melhores características, e por isso bastante mais caro, se não se conseguissem obter tensões inferiores a 40 MPa com os valores de projecto ainda que estes valores tenham coeficientes de segurança aplicados.

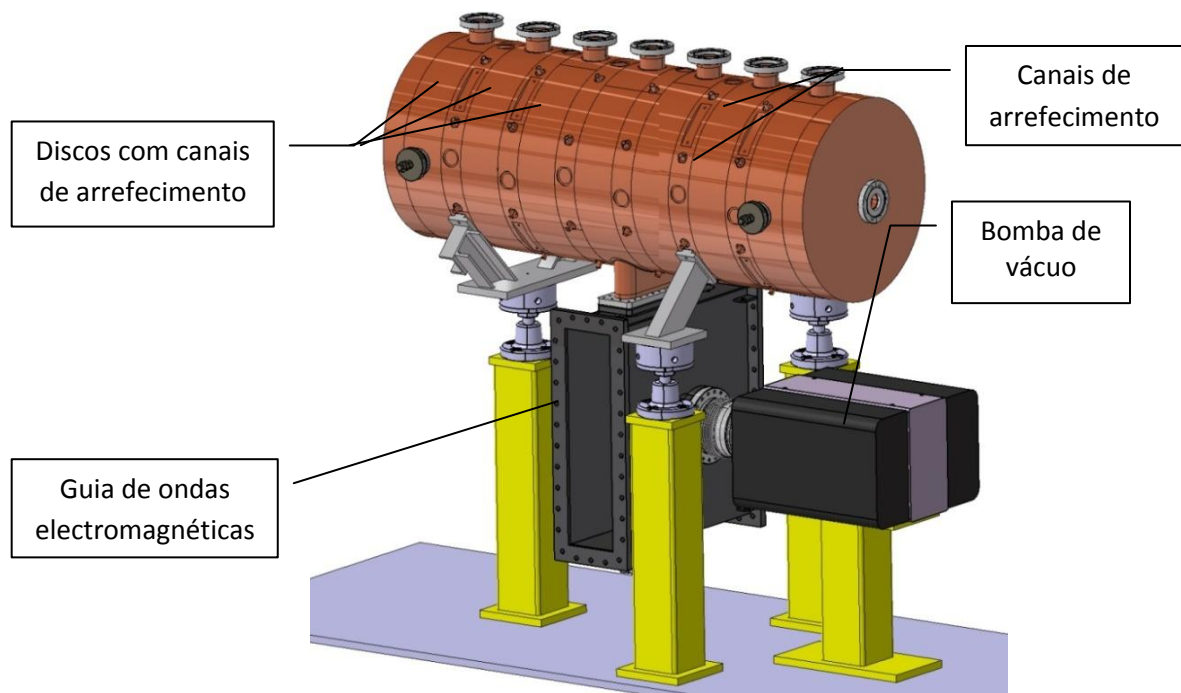


Figura 4.37: Modelo de CAD da estrutura do PIMS.

Para o dimensionamento dos canais de arrefecimento do PIMS e a sua optimização estrutural, dois modelos de elementos finitos foram analisados: (1) um modelo sólido com elementos do tipo *coupled field* para determinar a distribuição de temperaturas, as tensões térmicas e a deformação devida à expansão térmica. Este modelo de elementos finitos foi por sua vez, acoplado ao algoritmo genético do Matlab de modo a ser feita a optimização estrutural dos canais de arrefecimento; (2) um modelo fluido para determinar a perda de pressão e a velocidade local da água dentro dos canais de arrefecimento. No modelo sólido, a carga térmica resultante das perdas Ohmicas foram mapeadas na superfície por aproximação de áreas, como é explicado detalhadamente mais à frente, nesta secção.

O PIMS é uma estrutura que consiste em discos e cilindros (figura 4.38) que são maquinados a partir de blocos sólidos de cobre. Os canais de arrefecimentos são furados a partir do exterior, prevenindo qualquer risco de infiltrações de água para o vácuo no interior da cavidade.

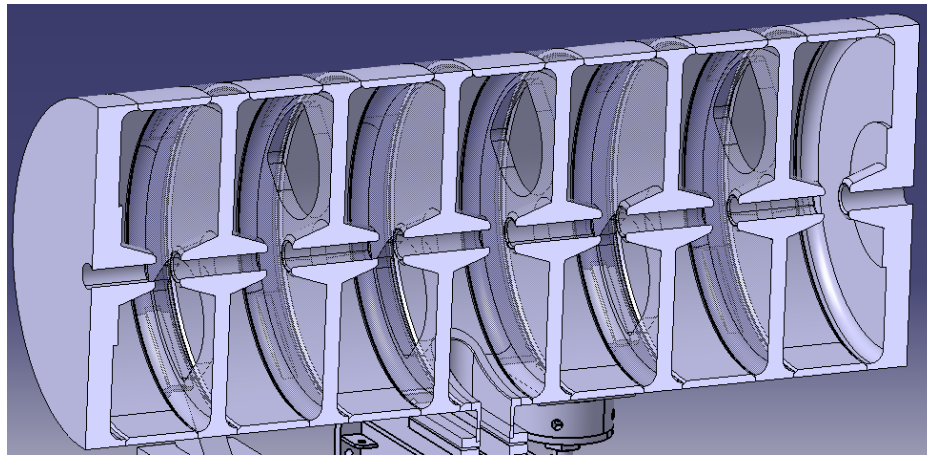


Figura 4.38: Secção do PIMS

Para cada disco há quatro canais de arrefecimento que deverão ser ligados em paralelo com o sistema de arrefecimento para obter uma melhor distribuição de temperaturas e evitar grandes perdas de pressão.

Depois de várias análises com diferentes configurações de canais de arrefecimento, a que se revelou mais eficiente em termos de distribuição de temperatura, e consequentemente em termos de tensões, é a apresentada na figura 4.39.

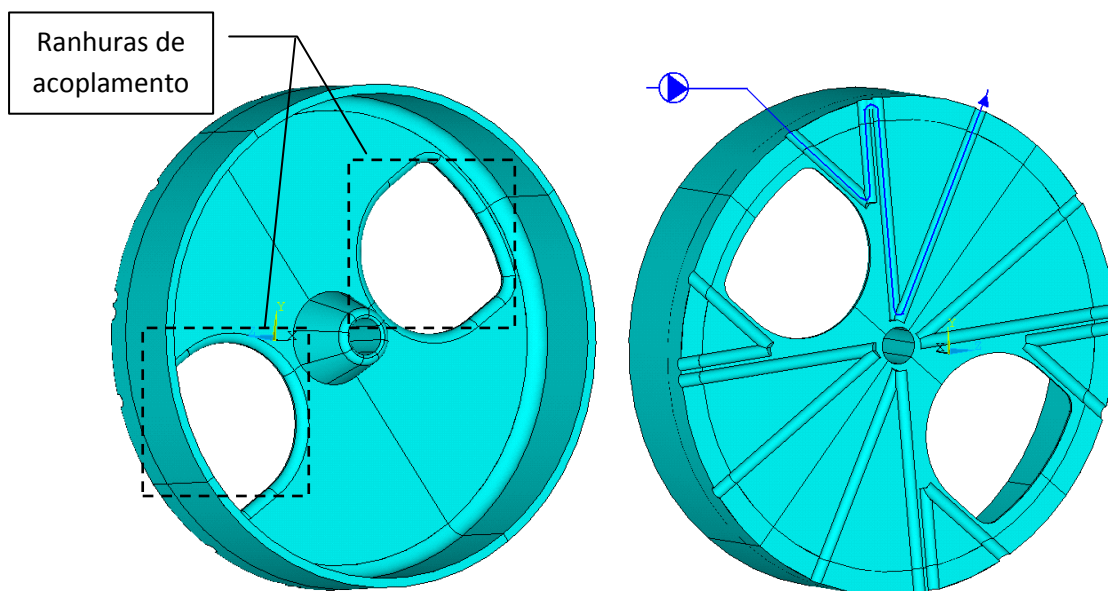


Figura 4.39: Geometria dos discos

Cada disco é a parede de separação entre células e tem duas ranhuras de acoplamento, de modo a acoplar as células. No centro do disco, a geometria assume a forma semelhante a um cone. O objectivo desta geometria é melhorar a impedância shunt (IS) da cavidade,

comparativamente a uma cavidade acoplada por ranhuras de acoplamento standard. Geometricamente, a impedância shunt (parâmetro que relaciona a tensão eléctrica V e a potência dissipada nas paredes da cavidade $P_d=V^2/IS$) é afectada pela geometria das ranhuras de acoplamento e pelo comprimento e raio do cone central. Por outro lado a expansão térmica do cone afecta o funcionamento da estrutura uma vez que a parte interna dos cones é responsável pela focalização do feixe de partículas. Os canais de arrefecimento, são deste modo necessários para arrefecer a estrutura e diminuir as alterações da geometria pelo fenómeno da expansão térmica. É também importante dotar a estrutura de arrefecimento adequado para limitar a temperatura máxima da cavidade e assim não alterar substancialmente a impedância shunt dos seus valores à temperatura ambiente. Por outro lado, a condutividade eléctrica do cobre decresce também com o aumento da temperatura.

O objectivo deste exemplo prático seria então dimensionar os canais de arrefecimento de modo a limitar a temperatura máxima do PIMS mas não havendo qualquer valor máximo imposto. Limitar também a expansão térmica no comprimento dos cones em $50\mu\text{m}$, uma vez que esta é a zona que, por questões geométricas, é a mais difícil de arrefecer e por isso onde é mais difícil de controlar a expansão térmica. Por outro lado, uma vez que com as várias análises preliminares efectuadas e com os constrangimentos tão exigentes não foi possível obter tensões inferiores a 40 MPa, procedeu-se á optimização estrutural via algoritmos genéticos.

4.4.1.Cálculos analíticos

4.4.1.1. *Balanço térmico*

Um balanço térmico pode ser aplicado para determinar quanto a temperatura média $T_m(x)$ varia com a posição ao longo do tubo e como o fluxo de calor por convecção total Q_{conv} está relacionado com a diferença de temperaturas entre a entrada e saída da água dos canais de arrefecimento.

O fluido move-se com o caudal mássico contante \dot{m} , e a transmissão de calor por convecção acontece na superfície interior do canal de arrefecimento. Tipicamente, a transferência de energia e a energia cinética e potencial na direcção axial são desprezíveis e os únicos efeitos significantes serão os efeitos associados com as alterações na energia térmica e com o trabalho do escoamento. O trabalho do escoamento é necessário para mover o fluido através

do volume controlo e, por unidade de massa de fluido, pode ser expresso como o produto da pressão do fluido p e pelo volume específico $v(v=1/\rho)$.

Considerando o volume de controlo como o volume interno do canal de arrefecimento, os termos de energia presentes são a taxa a que a energia térmica e mecânica entram e saem através da superfície do volume controlo, \dot{E}_{in} e \dot{E}_{out} . O processo onde a energia térmica pode ser criada dentro do volume controlo devido à conversão de outras formas de energia é chamada geração de energia, e a taxa à qual ocorre é designada por \dot{E}_g . O rácio de troca de energia armazenada dentro do volume controlo, dE_{st}/dt é designado como \dot{E}_{st} .

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{st} \quad (4.1)$$

A temperatura média do fluido a uma determinada secção transversal é definido em termos de energia térmica transportada pelo fluido enquanto se move através dessa secção transversal. O rácio a que este transporte ocorre, \dot{E}_t , pode ser obtido integrando o produto do fluxo de massa (ρu) e a energia interna por unidade de massa ($c_v T$) através da secção transversal A_c .

$$\dot{E}_t = \int_{A_c} \rho u c_v T dA_c \quad (4.2)$$

A temperatura média pode ser definida como

$$\dot{E}_t = \dot{m} c_v T_m \quad (4.3)$$

Se aplicarmos a conservação de energia da equação 4.1 e a equação 4.3 obtemos

$$dQ_{conv} + \dot{m}(c_v T_m + pv) - \left[\dot{m}(c_v T_m + pv) + \dot{m} \frac{d(c_v T_m + pv)}{dx} \right] = 0 \quad (4.4)$$

Ou

$$dQ_{conv} = \dot{m} d(c_v T_m + pv) \quad (4.5)$$

A equação 4.5 significa que a taxa de transferência de calor por convecção para o fluido deve igualar a taxa a que a energia térmica do fluido aumenta mais a taxa a que o fluido em movimento através do volume controlo produz trabalho. Assumindo que o fluido é um gás ideal ($pv=RT_m$, $C_p=C_v+R$), a equação 4.5 reduz-se a

$$dQ_{conv} = \dot{m} c_p \Delta T_m \quad (4.6)$$

Se usarmos a equação e fixarmos C_p e o raio da secção transversal $r=6\text{mm}$, podemos fazer um gráfico da variação da temperatura entre a saída e entrada de água, em função com a velocidade média normal do escoamento.

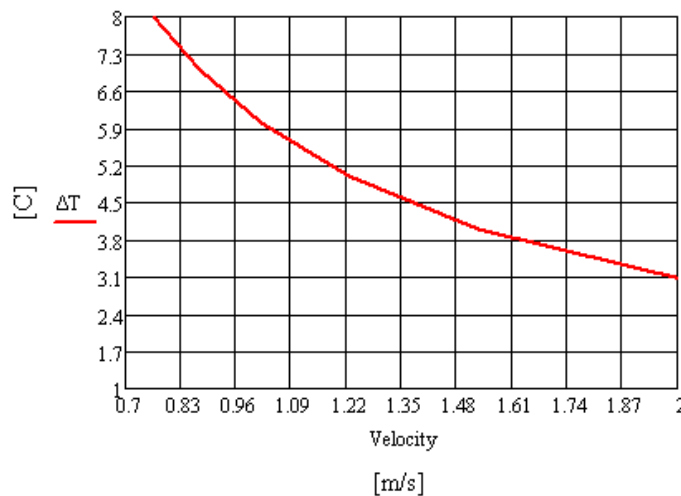


Figura 4.40: Variação do aumento de temperatura entre a saída e entrada de água em função da velocidade média do escoamento.

Para uma velocidade média igual a 1.3 m/s temos um aumento de temperatura de aproximadamente 4.7 °C.

Soluções com escoamentos rápidos podem frequentemente destruir a película e depósitos que de outra forma poderiam oferecer protecção contra a corrosão. A remoção destas películas por acção da erosão do escoamento resulta em corrosão acelerada, chamada erosão-corrosão. O ataque é acelerado particularmente nos cotovelos e noutras alterações estruturais que alteram a direcção do escoamento e velocidade originando turbulência. Para evitar este problema, a velocidade média da água não deverá ser superior a 1.5 m/s e/ou a água deverá ser desmineralizada.

4.4.1.2. Coeficiente de convecção no interior do canal

O número de Reynolds para um escoamento num tubo circular por ser definido como, Incropera e DeWitt (1996):

$$Re_D = \frac{\rho U_m D}{\mu} \quad (4.7)$$

onde U_m é a velocidade média de escoamento ao longo da secção transversal do tubo, D é o diâmetro interno, ρ e μ são a densidade e viscosidade do fluido respectivamente.

Num escoamento completamente desenvolvido, o número crítico de Reynolds correspondente ao início de turbulência é

$$Re_D \approx 2300 \quad (4.8)$$

Embora valores superiores do número de Reynolds ($Re_D \approx 10,000$) sejam necessários para obter condições completamente turbulentas, Incropera e DeWitt (1996).

Para determinar o coeficiente de convecção para um escoamento turbulento num tubo circular podemos usar a fórmula do número de Nusselt Nu para escoamento laminar, considerando correlações empíricas pertinentes para o escoamento turbulento.

$$Nu = \frac{h_w D}{k} \quad (4.9)$$

Onde h_w é o coeficiente de convecção para a água, D é o diâmetro do tubo e K a condutividade térmica.

O número de Nusselt Nu para escoamento turbulento pode ser determinado com a correlação atribuída a Petukhov, que é da forma

$$Nu_D = \frac{(f/8) Re_D Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (4.10)$$

Onde o número de Reynolds pode ser calculado com a equação 4.7, Pr é o número de Prandtl, e f é o factor de fricção que pode ser obtido através do diagrama de Moody.

Se combinarmos as equações 4.7, 4.9 e 4.10 podemos obter o coeficiente de convecção para os canais de arrefecimento de 6 mm de raio.

4.4.1.3. Perda de pressão

Se assumirmos que o arrefecimento da estrutura vai ser feito com os 4 canais de arrefecimento em paralelo, apenas será necessário o cálculo da perda de pressão para um dos canais. Esse cálculo é apresentado nesta secção.

As perdas de pressão ao longo de um tubo de secção constante podem ser calculadas com a equação de Darcy-Weisbac:

$$\Delta P_t = f \frac{L}{D} \rho \frac{w^2}{2} \quad (4.11)$$

Onde f corresponde ao factor de fricção, L ao comprimento do tubo, D ao diâmetro, ρ à densidade da água, e w à velocidade média.

Para os cotovelos, a perda de pressão pode ser calculada a partir da equação seguinte, Fried e Idelchik (1989)::

$$\Delta P_c = \gamma \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2} \quad (4.12)$$

Onde γ é o coeficiente de resistência do fluido, ρ a densidade da água, e w a velocidade média.

$$\gamma = k_\Delta k_{Re} C_1 A \gamma_{loc} \quad (4.13)$$

Onde k_Δ é uma função do número de Reynolds e do diâmetro, k_{Re} é uma função do número de Reynolds, C_1 é uma função do diâmetro, e γ_{loc} é uma função do ângulo do cotovelo. Todos estes valores são dados por tabelas.

Se aplicarmos as equações 4.12 e 4.13 podemos calcular a perda de pressão para um dos 4 canais de arrefecimento ligados em paralelo. Neste caso, cada canal de arrefecimento é constituído por 4 tubos direitos com os seguintes comprimentos $L_1= 130\text{mm}$, $L_2= 115\text{mm}$, $L_3= 245\text{mm}$, $L_4= 250\text{mm}$, e 3 cotovelos: $E_1=45$ graus, $E_2=180$ graus and $E_3= 30$ graus. A perda de pressão ΔP_e total, é aproximadamente:

$$\Delta P_e = 0.110 \text{ bar} \quad (4.14)$$

4.4.2. Métodos computacionais em dinâmica dos fluidos

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) é um dos ramos da mecânica dos fluidos que utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas que envolvem escoamentos de fluidos. Os computadores são utilizados para efectuar cálculos necessários para simular a interacção de fluidos e gases com as superfícies complexas utilizadas em engenharia.

A base fundamental de qualquer problema de DFC são as equações de Navier-stokes, que definem qualquer escoamento de uma fase. Estas equações podem ser simplificadas se se removerem os termos que descrevem a viscosidade (equações de Euler). Para uma maior simplificação, podem ser removidos os termos que descrevem os vórtices (equações de escoamento potencial). Por último, estas equações podem ser linearizadas (equações de escoamento potencial linearizado).

A análise de DFC presente nesta dissertação foi efectuada através do programa Ansys CFX. O objectivo desta simulação foi comparar os resultados obtidos com os valores determinados analiticamente. Assumiu-se uma velocidade média normal à entrada igual a 1.3 m/s e uma pressão igual a zero à saída do canal.

A Figura seguinte representa a malha utilizada para a simulação. Os elementos são do tipo tetraedro e a malha *patch independent*. Este tipo de malha não é gerada a partir de uma malha de superfície prévia. Esta propriedade permite-nos criar *inflation layers* como se pode ver na figura 4.41. A *inflation layer* foi introduzida na superfície de interface parede-fluido de modo a obter uma melhor precisão no cálculo junto a esta zona.

O modelo de turbulência escolhido foi o *k-epsilon*. Além de ser o modelo mais utilizado e validado (Versteeg e Malalasekera, 2007), permite-nos introduzir o valor de rugosidade superficial. Este modelo tem uma performance particularmente boa em escoamentos fechados onde as tensões tangenciais de Reynolds são mais importantes.

A influência da parede no escoamento é do tipo *No Slip*, e a rugosidade da parede de cobre, assumida para o cálculo igual a 0.005 mm.

A figura 4.42 mostra o resultado da simulação das linhas de corrente e representa a variação da velocidade do escoamento ao longo do canal de arrefecimento. A velocidade média da água é aproximadamente 1.3 m/s mas localmente, nos cotovelos, chega ao máximo de 3 m/s.

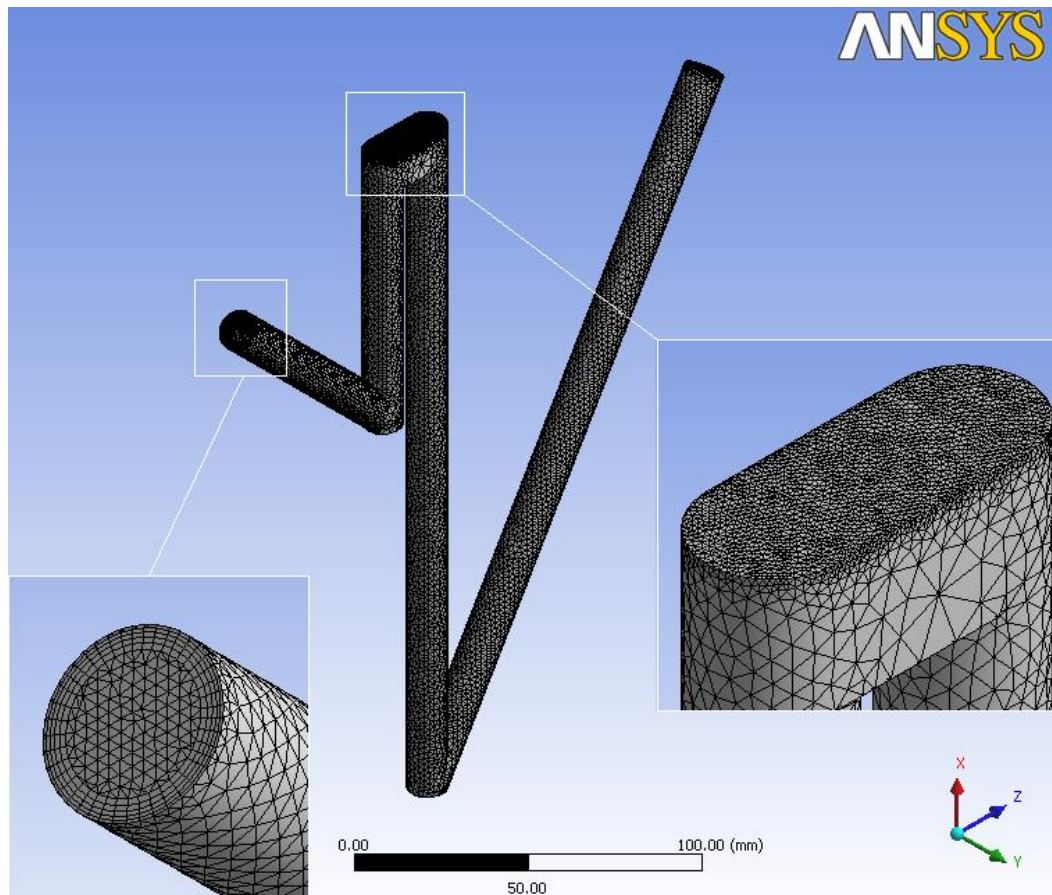


Figura 4.41: Malha para a simulação computacional de dinâmica dos fluidos.

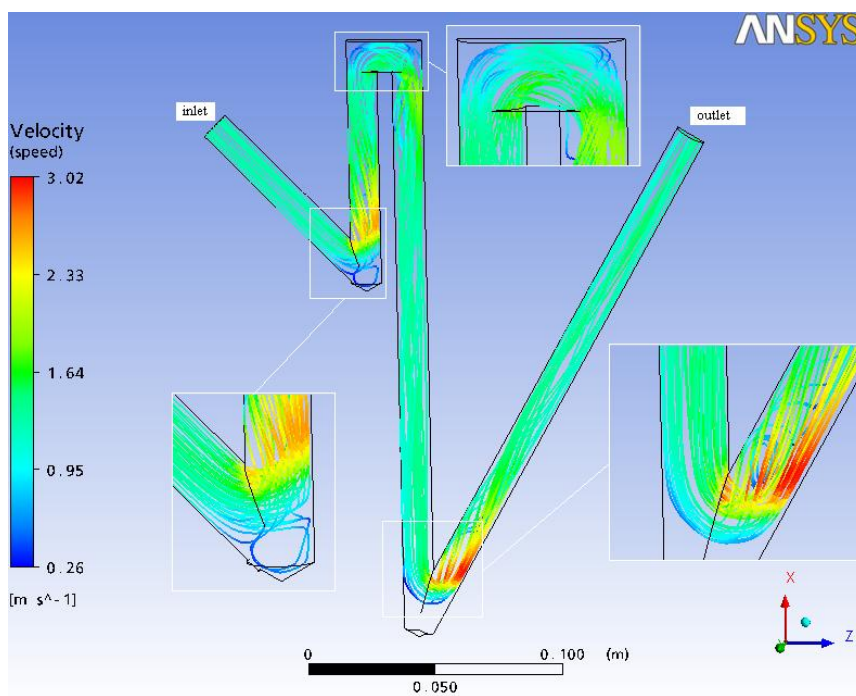


Figura 4.42: Representação gráfica da velocidade e das linhas de corrente.

A figura 4.43 é a representação gráfica dos vectores de velocidade que mostram a direcção do escoamento em cada ponto.

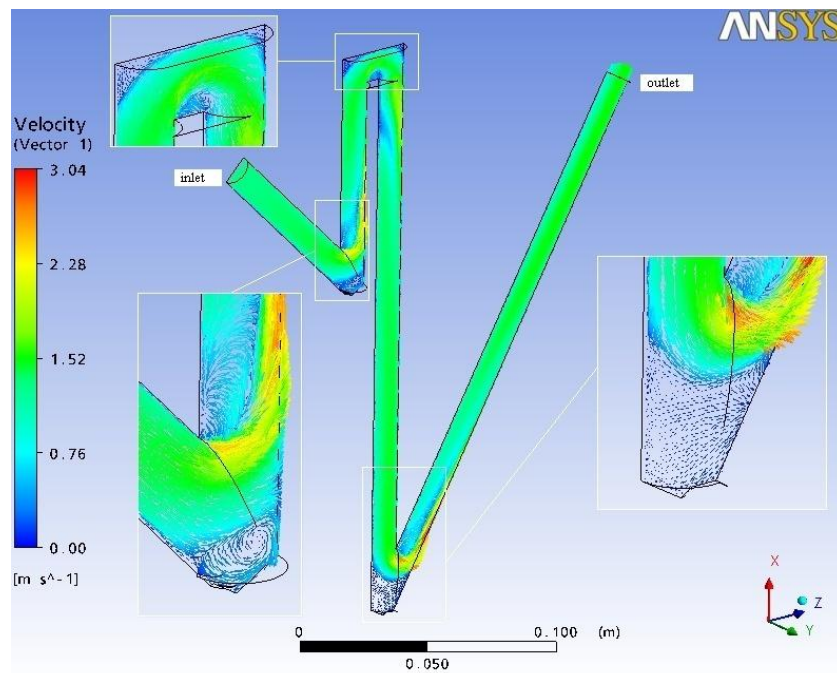


Figura 4.43: Representação vectorial da velocidade.

A figura 4.44 mostra-nos o gradiente de pressões. Embora a perda de pressão calculada analiticamente entre a entrada e a saída do canal de arrefecimento seja igual 0.80 bar, este não é o valor máximo de perda de pressão ao longo do escoamento. O valor máximo está localizado logo a seguir ao último cotovelo e é igual a 0.110 bar (perda de pressão em relação a entrada de água no canal).

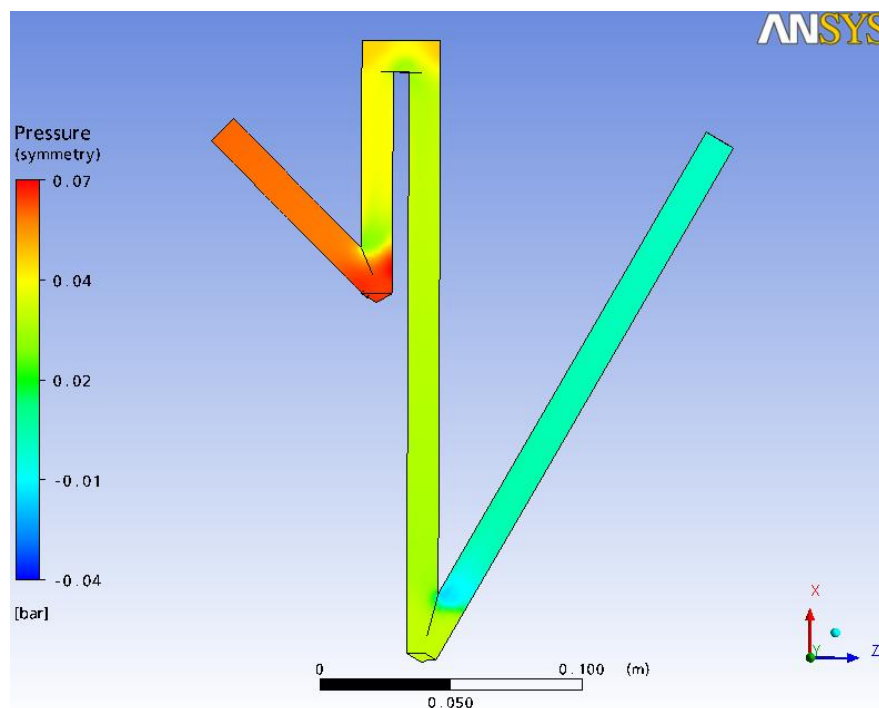


Figura 4.44: Variação de pressão ao longo do canal.

4.4.3. Dados Para o Problema e Modelo de Elementos Finitos

4.4.3.1. Propriedades do Material

O material utilizado será o Cobre UNS C10100 que tem as seguintes propriedades mínimas, se a última etapa de forjagem não for executada:

Material	Densidade P [g/cm ³]	Modulo de Elasticidade E [GPa]	Tensão de Cedência $R_{p0.2}$ [MPa]	Tensão de Ruptura R_m [MPa]	Conductividade Térmica [W/m.K]
Cobre UNS C10100	2.77	110	40-60	240-280	400

Tabela 4.4: Propriedades do Cobre UNS C10100

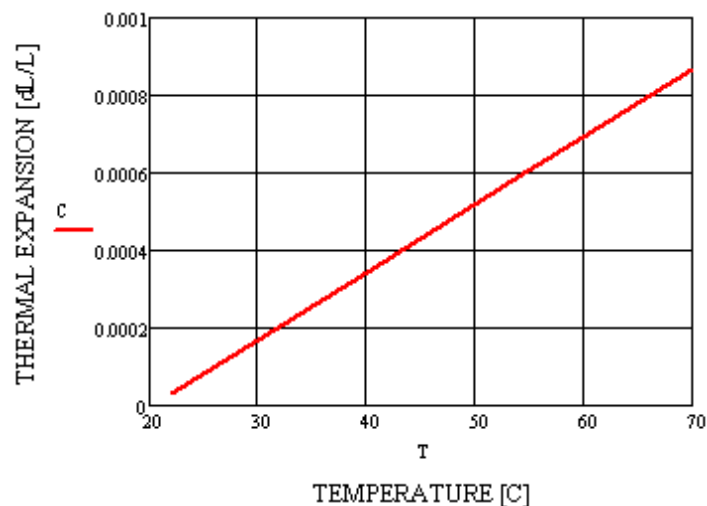


Figura 4.45: Expansão térmica do cobre de 20 C até 70 C.

4.4.3.2. Geometria, Elementos e Condições Fronteira

A geometria foi modelada com elementos do tipo *SOLID226*. Este elemento tem 20 nós e a possibilidade de usar até 5 graus de liberdade por nó. As capacidades estruturais são elásticas apenas e como elemento sólido do tipo *coupled-field*, permite resolver problemas estruturais e térmicos numa única análise. Neste caso utiliza-se apenas 4 graus de liberdade, as translações segundo X, Y, Z e a temperatura, T .

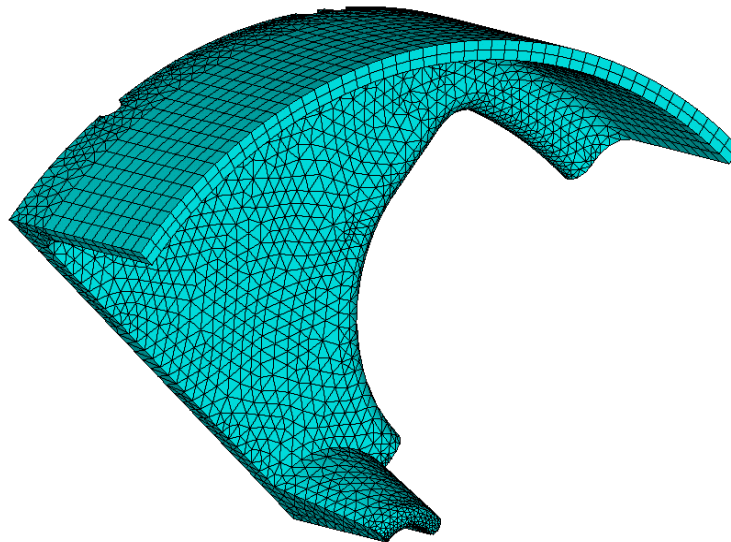


Figura 4.46: Geometria e malha do modelo de elementos finitos.

As únicas cargas aplicadas neste exemplo prático foram cargas do tipo térmico. Análises prévias demonstraram que o peso próprio da estrutura, assim como o peso das estruturas a ela acopladas produziam tensões muito baixas e por isso consideradas desprezíveis.

Foi estudado apenas um oitavo da peça, devido à simetria. Uma vez que a distribuição deste fluxo de calor está longe de ser uniforme (figura 4.47), tendo valores elevados em pontos localizados, optou-se por fazer uma divisão de áreas de modo a aproximar o melhor possível o fluxo de calor aplicado na estrutura (figura 4.48).

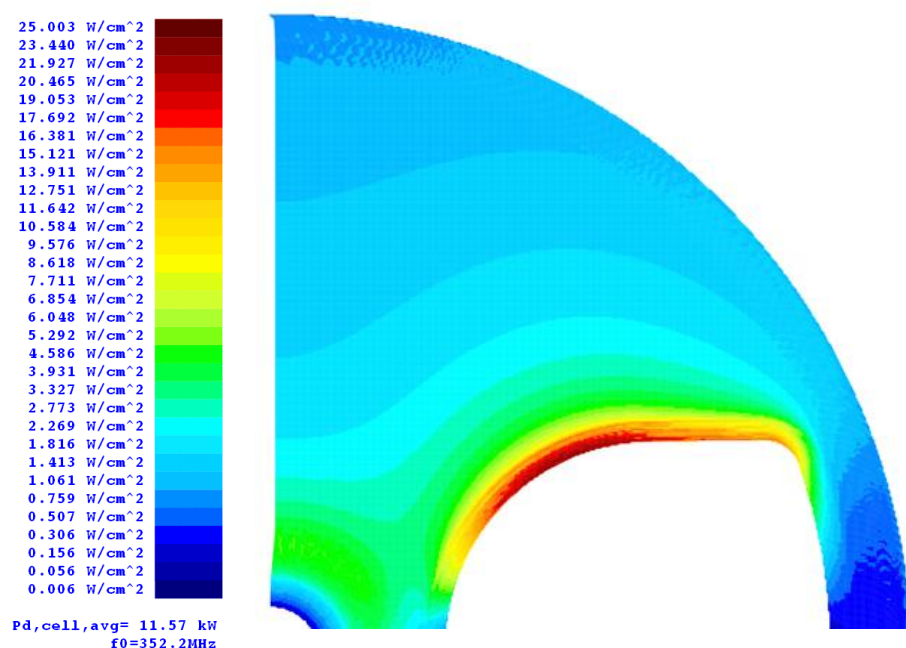


Figura 4.47: Distribuição do fluxo de calor na superfície do PIMS.

A figura anterior representa o fluxo de calor gerado pelas perdas de rádio-frequência. O coeficiente de segurança aplicado ($CS=1.6$) no dimensionamento dos canais de arrefecimento foi aplicado no fluxo de calor uma vez que os valores da figura utilizados no cálculo foram obtidos para uma rádio-frequência de 10% da potência total, onde, de acordo com os últimos cenários, para um SPL de alta potência é provável que o LINAC4 nunca irá operar com potências superiores a 6%.

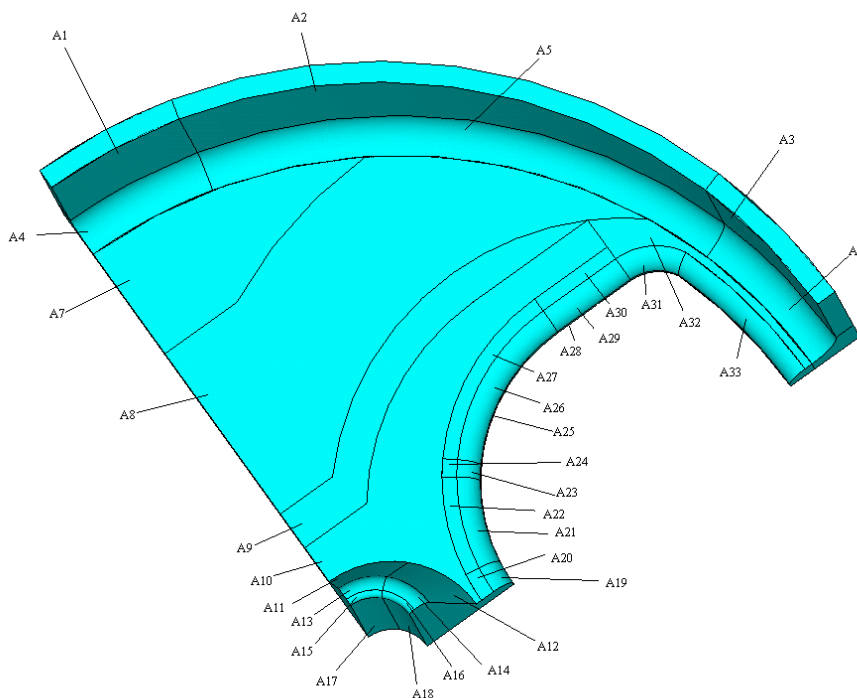


Figura 4.48: Divisão da estrutura por áreas para aplicação do fluxo de calor.

4.4.4. Cálculos Numéricos Pelo Método dos Elementos Finitos e Otimização Estrutural Via Algoritmo Genético

Como foi explicado anteriormente, o constrangimento mais difícil de controlar é a expansão térmica no comprimento dos cones em $50\mu\text{m}$ devido à distância entre estes e os canais de arrefecimento. Por outro lado, o objectivo deste exemplo prático é proceder à optimização estrutural via algoritmos genéticos de modo a minimizar as tensões originadas pelas diferenças de temperatura na estrutura.

Consideraram-se 5 variáveis de projecto que são o coeficiente de convecção (CONVE), a temperatura média da água (TEMP) e as alterações geométricas explicadas na figura seguinte:

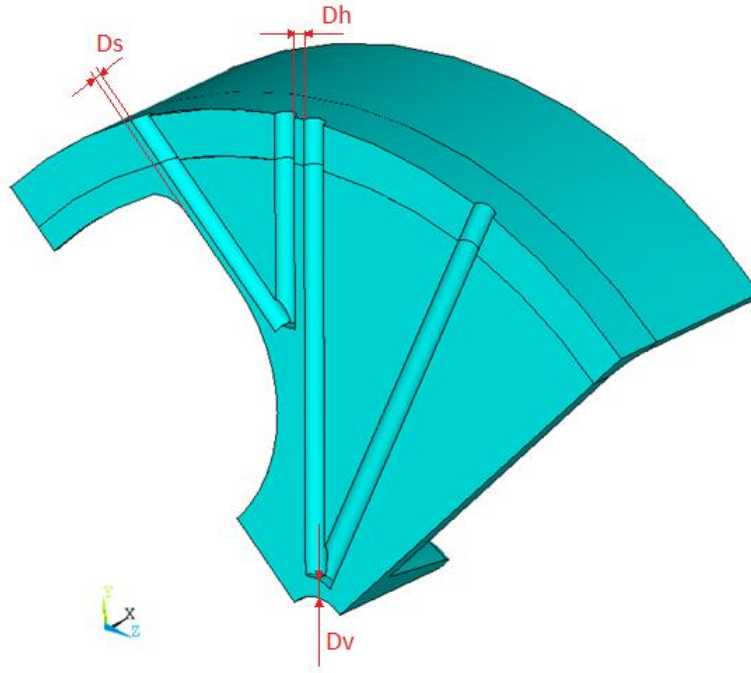


Figura 4.49: Parâmetros geométricos variáveis no algoritmo genético.

Onde D_s é a distancia mínima entre o canal de arrefecimento e a ranhura de acoplamento, D_h é a distancia mínima entre os troços centrais e D_v é a distancia mínima entre o canal de arrefecimento e o centro da estrutura.

As restrições laterais para cada variável de projecto são as seguintes:

$$5000 \frac{W}{m^2 K} \leq CONVE \leq 8000 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.15)$$

$$14 \text{ } ^\circ\text{C} \leq TEMP \leq 24 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.16)$$

$$4 \text{ mm} \leq D_s \leq 7 \text{ mm} \quad (4.17)$$

$$4 \text{ mm} \leq D_h \leq 7 \text{ mm} \quad (4.18)$$

$$4 \text{ mm} \leq D_v \leq 10 \text{ mm} \quad (4.19)$$

Embora grande parte das optimizações via algoritmo genético utilizem variáveis discretas, neste caso estas assumem valores reais contínuos de acordo com a resolução do problema. O problema foi codificado usando cromossomas binários de 25 genes, sendo os 7 primeiros

referentes à variável temperatura, aos 5 seguintes para a convecção, as seguintes 4 para D_s , as seguintes 4 para D_h e as últimas 5 para D_v . Na *gatool* do MATLAB especificou-se portanto *Number of variables* igual a 25 e *Population type* igual a *bit string*. Também se optou por considerar uma população com 25 indivíduos escolhendo *Population size* igual a 25 e por usar uma escala de mérito baseada na ordenação (*Rank*) dos indivíduos e o operador de selecção do tipo roleta (*Roulette*). Consideram-se 25 iterações do algoritmo.

Utilizou-se uma estratégia elitista com *elite count* igual a 2 e *crossover fraction* igual a 0.8. Esta estratégia copia os cromossomas mais aptos de uma geração para a geração seguinte sem que sobre eles seja efectuada qualquer operação. A *elite count* é o número de indivíduos vão ser copiados e o *crossover fraction* corresponde ao número de indivíduos que são criados por cruzamento, excluindo os indivíduos de *elite count*.

Os restantes indivíduos são originados por mutação ou seja, se dos 25 cromossomas que constituem uma geração, 2 fazem parte da elite a ser copiada e $0.8 \times 23 = 18$ são originados por cruzamento, restam 5 indivíduos que serão obrigatoriamente originados por mutação. A operação de mutação do Matlab utiliza por defeito uma função de mutação do tipo Gaussiana que adiciona um número ao acaso, escolhido de uma distribuição de Gauss, a cada vector progenitor. Tipicamente, a quantidade de mutação que é proporcional ao desvio normal da distribuição, decresce em cada geração.

O operador cruzamento escolhido é do tipo *scattered*, e cria um vector binário ao acaso. Depois selecciona os genes onde o vector é um 1 do primeiro progenitor, e os genes onde o vector é 0 do segundo progenitor, e combina estes genes.

Pretende-se minimizar a tensão máxima na estrutura considerando que o deslocamento na extremidade do cone (EC) não deve ultrapassar $50\mu\text{m}$. Por isso foi definida a função objectivo $FO = TS + k \times P$, onde TS é o valor da tensão máxima na estrutura, k é uma constante que tem de ser “afinada” para o problema e P a diferença entre o valor obtido para o deslocamento na extremidade do cone em cada análise e o limite considerado, $P = \text{Exp} - 50\mu\text{m}$.

4.4.5. Resultados

4.4.5.1. Resultados do algoritmo genético

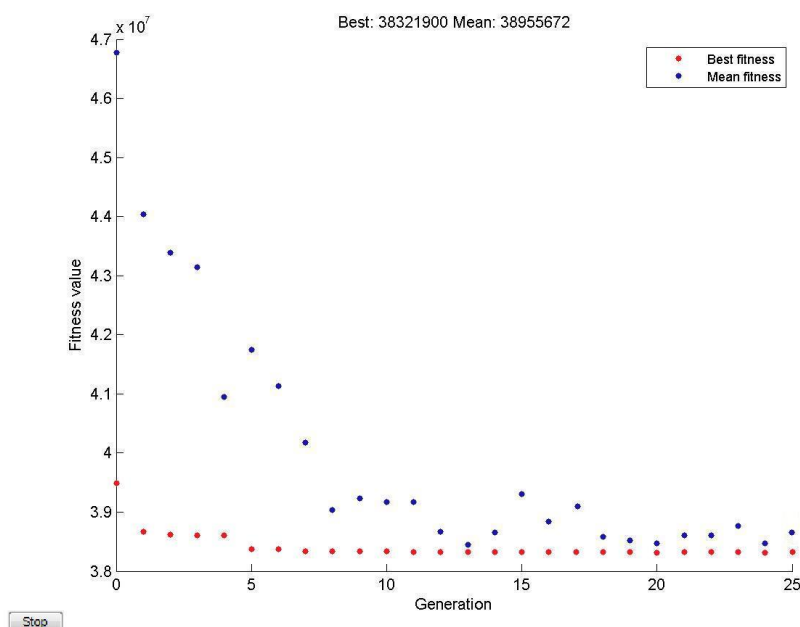


Figura 4.50: Evolução do cálculo no algoritmo genético.

						RESULTADOS	
	CONVE $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	TEMP [C]	Ds [mm]	Dh [mm]	Dv [mm]	Expansão térmica na extremidade do cone [μm]	Tensão [MPa]
ULTIMO PONTO	~6350	~19	~6	~6	~10	50	~38.3

Tabela 4.5: Resultados do algoritmo genético.

4.4.5.2. Resultados da análise de elementos finitos

O AG obteve a solução descrita na Tabela 4.5. Observando os resultados da análise por elementos finitos para essa combinação dos parâmetros, verifica-se que as zonas mais quentes (63 C) são a extremidade do cone e nas ranhuras de acoplamento. Por outro lado, a zona mais fria (33.5 C) está localizada onde os troços dos canais estão mais próximos, como esperado. Esta diferença de temperaturas deverá ser a mais baixa possível de modo a minimizar as tensões por ela originadas.

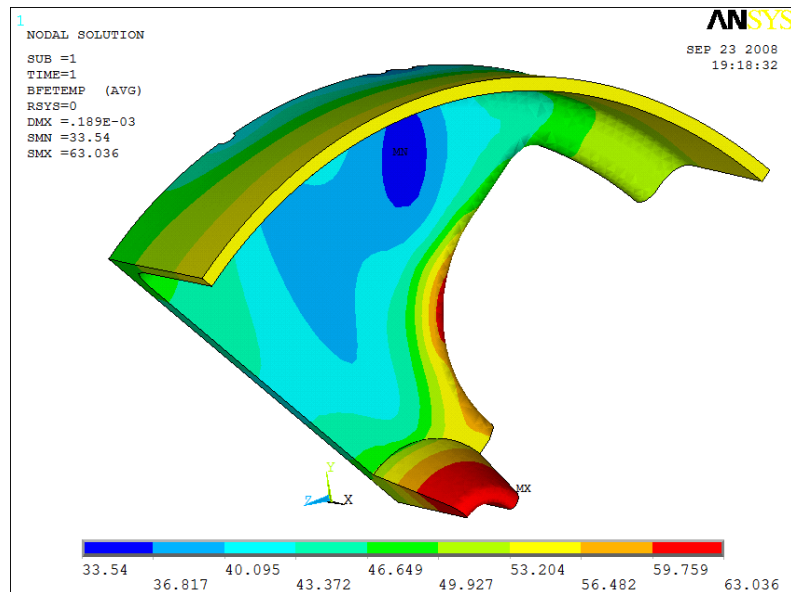


Figura 4.51: Distribuição de temperaturas (lado 1)

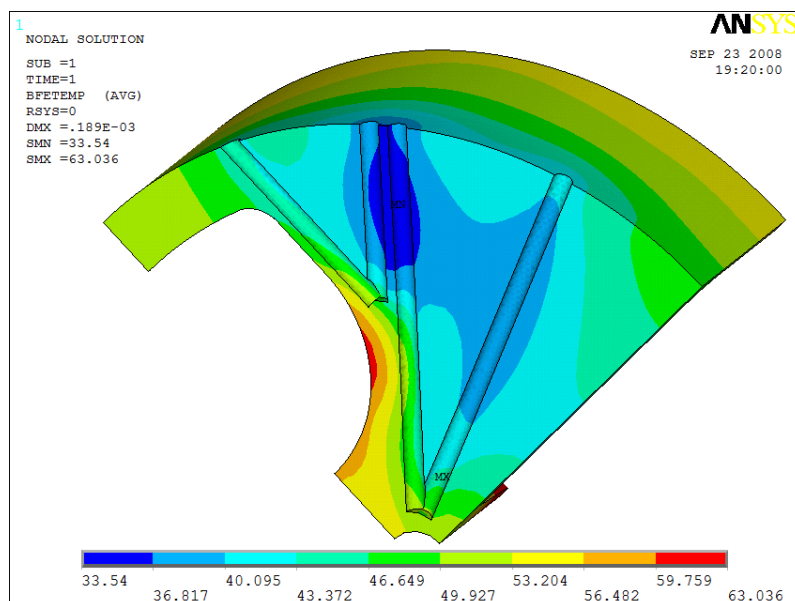


Figura 4.52: Distribuição de temperaturas (lado 2).

Na figura seguinte podemos ver a distribuição de tensões. Os valores das tensões são globalmente baixos mas, na zona das ranhuras de acoplamento, a tensão chega aos ~38MPa. A tensão de cedência esperada do cobre utilizado (quando omitido o ultimo passo de forjagem) encontra-se entre os 40MPa e 60 MPa.

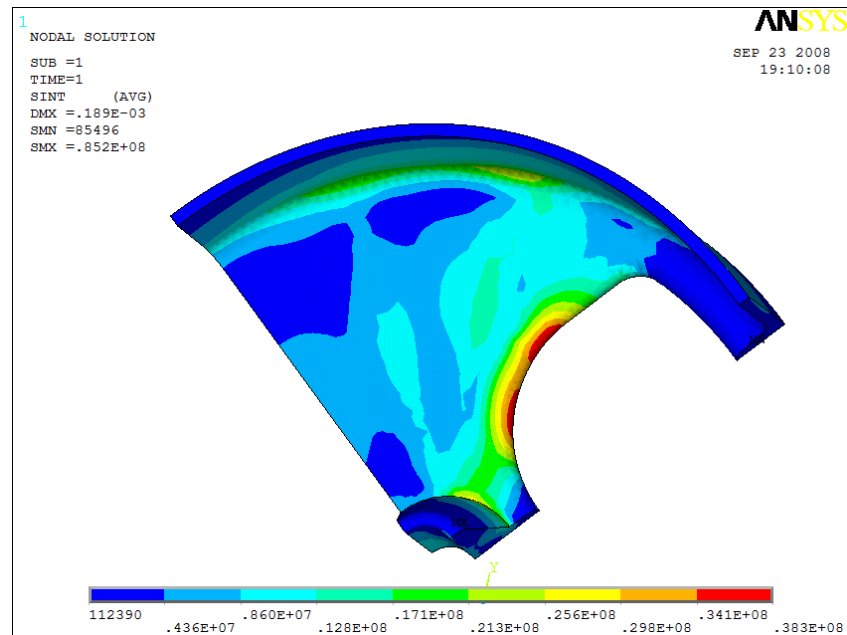


Figura 4.53: Distribuição de tensões (lado 1)

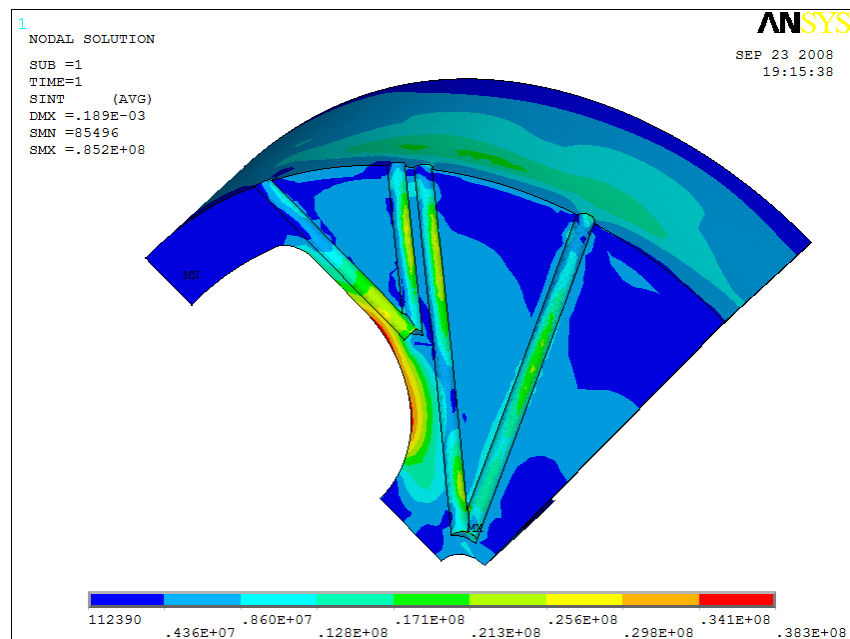


Figura 4.54: Distribuição de tensões (lado 2).

Na figura seguinte podemos ver o resultado do alongamento do cone central devido à expansão térmica ($50\mu\text{m}$).

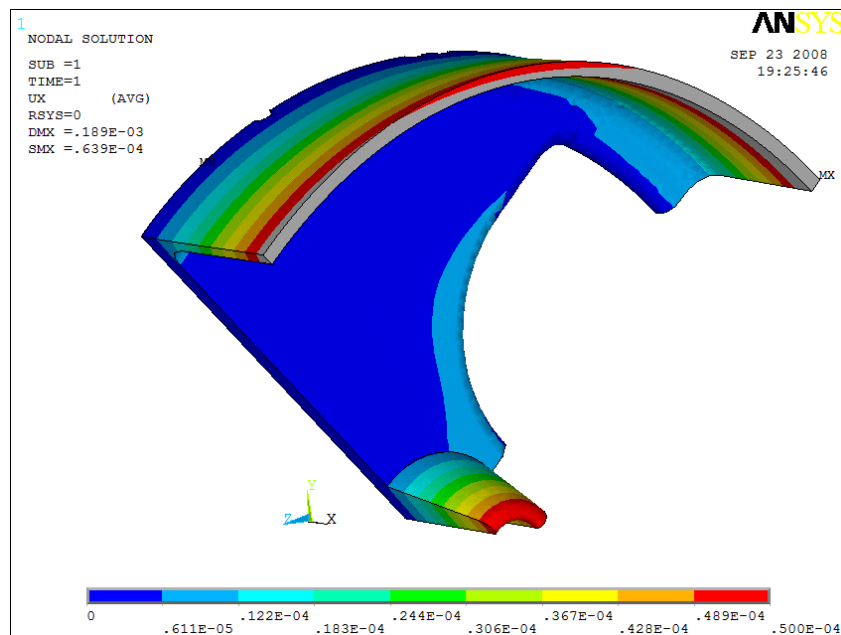


Figura 4.55: Expansão térmica máxima na extremidade do cone, na direcção X (50 μ m).

Verificou-se que o AG obteve uma solução válida que cumpre o requisito de deslocamento imposto e simultaneamente conduz a tensões máximas no cobre inferiores aos 40 MPa como é conveniente que suceda. A utilização de computação paralela permitiu reduzir consideravelmente o tempo de cálculo que poderia ser considerado excessivo se tal metodologia não fosse empregue. De facto, cada análise de elementos finitos requer cerca de 7 minutos devido à utilização de elementos do tipo *coupled*, onde o cálculo é feito simultaneamente para os campos de temperatura e dos deslocamentos.

Como o algoritmo evoluiu durante 25 gerações, isso corresponde a $25 \times 25 \times 7 = 4375$ minutos (~3 dias) de cálculo total para o problema de optimização. Utilizando a computação paralela e cinco processos executados em cinco computadores distintos, foi possível reduzir para 960 minutos o tempo de cálculo, o que significa que se obteve um factor de aceleração igual a 4.6.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

Apresentaram-se algumas aplicações dos métodos computacionais na actividade de projecto em Engenharia Mecânica, através de exemplos concretos que foram abordados durante um estágio realizado no CERN.

Foram apresentados três exemplos de aplicação. No primeiro exemplo, utilizou-se o método dos elementos finitos aplicado ao design de um componente do *Newtron Time of Flight* (*nTOF*). No segundo exemplo de aplicação, o método dos elementos finitos é utilizado para simular o processo de brasagem do *Radio Frequency Quadrupole* (RFQ). O terceiro exemplo, incluiu uma análise de dinâmica dos fluidos e a optimização estrutural dos canais de arrefecimento do *Pi-mode Structure* (PIMS), através do algoritmo genético do MATLAB acoplado a simulações de elementos finitos do ANSYS.

O programa de elementos finitos ANSYS tem uma grande importância na resolução de problemas de grande complexidade, tanto estruturais como de dinâmica dos fluidos, quando comparada com a limitação das soluções analíticas. Permite a criação de modelos numéricos e a análise do seu comportamento com elevado grau de detalhe, contudo, para obter sucesso na aplicação destes modelos, é necessário que as informações fornecidas (propriedades físicas, dimensionamentos e cargas/deslocamentos aplicados) sejam bem caracterizadas. Nos trabalhos efectuados demonstraram-se algumas das potencialidades deste programa, nomeadamente na simulação dos comportamentos elástico e elasto-plástico do material, e da dinâmica dos fluidos.

O uso de ferramentas como o ANSYS e o MATLAB requer simultaneamente um bom conhecimento dos princípios que estão na base do seu desenvolvimento e uma boa perícia na sua manipulação. Com elas é possível obter soluções quando os constrangimentos são exigentes e análises detalhadas do comportamento estrutural são necessárias.

Por último, demonstrou-se neste estudo como uma combinação inovadora destas ferramentas pode contribuir para obter aplicações úteis para a actividade de projecto em engenharia. A introdução do processamento em paralelo é particularmente importante na resolução de problemas que exigem um elevado tempo de cálculo, permitindo diminuir este último por um factor aproximadamente igual ao número de computadores disponíveis.

REFERÊNCIAS

- Cardoso, J.M.B., Coelho, P.S.G., Almeida, J.R., (2002). “*Aplicação de Algoritmos Genéticos em Otimização Estrutural*”, Actas do V Congreso de Métodos Numéricos en Ingenieria, eds. J.M. Goicolea, C. Mota Soares, M.Pastor, G. Bugada, @SEMNI, Madrid, Espanha.
- Cavicchio, D. J. (1972). “*Reproductive Adaptive Plans.*” *Proceedings, ACM 1971 Annual Conference.*, Association of Computing Machinery, Boston.
- Chen, D. (1997). “*Least Weight Design of 2-D and 3-D Geometrically Nonlinear structures Using a Genetic Algorithm.*” Ph.D. dissertation, The University of Memphis, Memphis, Tennessee.
- Cheng, F.Y. e Li, D. (1997). “*Multi-objective Optimization Design with Pareto Genetic Algorithm.*” *ASCE J. of Struct. Engrg.*
- Cheng, F.Y. e Li, D. (1998). “*Genetic Algorithm Development for Multi-objective Optimization of Structures.*” *AIAA Journal.*
- Darwin, C. (1859). “*On the origin of species by means of natural selection*”. John Murray, London.
- Darwin, C. (1871). “*The descent of man, and selection in relation to sex*”. London.
- De Jong, K. A. e Spears, W. M. (1992) “*A Formal Analysis of the Role of Multi-point Crossover in Genetic Algorithms.*” *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence Journal.*
- Dhingra, A. K., e Lee, B.H. (1994). “*A Genetic Algorithm Approach to Single and Multi-objective Structural Optimization with Discrete-Continuous Variables.*” *Int. J. Numer. Meth. Engrg.*
- Eshelman, L., Caruana, R., e Schaffer, D. (1989). “*Biases in the Crossover Landscape.*” *Proc. Of 3rd Int. Conf. on Genetic Algorithms* (Ed. Schaffer, J. D.), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

- Fried, E., Idelchik, I. E. (1989). *“Flow resistance: A Design Guide for Engineers”*. Taylor & Francis, Philadelphia, PA.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison Wesley.
- Goldberg, D. E. e Deb, K. (1991). *“A comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms.”* Proceedings of the foundations of Genetic Algorithms Workshop, Blooming, Indiana.
- Goldberg, D.E. e Samtani, M. P. (1986). *“Engineering Optimization via Genetic Algorithms.”* Proc. Of 9th Conf. on electronic Computation, ASCE, New York, N. Y.
- Hajela, P. (1992). *“stochastic Search in Structural Optimization: Genetic Algorithms and Simulated Annealing.”*
- Hajela, P. e Lee, E. (1993a). *“Genetic Algorithms in Topological Design of Grillage Structures.”* Proc., IUTAM Symp. On Discrete Structural Systems, IUTAm, Zakopane, Poland.
- Hajela,P. e Lee, E. (1993b). *“Genetic Algorithms in Structural Topological Optimization.”* Topology Design of Structures, Bendsoe e Mota Sores, Eds., Luwer Academic Publishers, Boston, Mass.
- Hajela,P. e Lee, E. (1995). *“Genetic Algorithms in Truss Topological Optimization.”* Int. J. Solid structures, Vol.32.
- Holland, J.H. (1975). *“Adaptation in Natural and Artificial Systems”*. Ann Arbor: The University of Michigan Press.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P. (1996). *“Fundamentals of Heat and Mass Transfer”*. John Wiley & Sons, USA.
- Jenkins, W.M. (1991a). *“Towards Structural Optimization Via the Genetic Algorithm.”* Computers & Structures.
- Jenkins, W.M. (1991b). *“Structural Optimization with The Genetic Algorithm.”* The Structural Engineer.

- Kicinger, R.P., Arciszewski, T., De Jong, K.A. (2005) “*Evolutionary Computation and Structural design: A survey of the state of the art*”. Elsevier, Mason Archival repository Service (US).
- Nair, P. B., Keane, A.J., e Shimpi, R.P. (1998). *Combining Approximation concepts with Genetic Algorithm-Based Optimization.*” AISS/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Material conf., Vol 2., AIAA, Reston VA, USA.
- NF EN 13445 (2002). “*Réceptacles sous pression non soumis à la flamme*”. AFNOR, Cedex, France.
- Ramasamy, J.V. e Rajasekaran, S. (1996). “*Artificial Neural Network and Genetic Algorithm for the Design Optimization of Industrial Roofs – A Comparison.*” Computers and Structures, Vol. 58.
- Samad, A., Kim, K-Y (2008). “*Shape Optimization of an Axial Compressor Blade by Multi-objective Genetic Algorithm*”. I MECH E Part A Journal of Power and Energy, Volume 222, Number 6, pp. 599-611(13).
- Spears, W. M. e De Jong, D. (1991). “*On the Virtues of Parameterized Uniform Crossover.*” Proc. Of 4th Int. Conf. on Genetic Algorithms. (eds. Belew R. and Booker, L.), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- Syswerda, G. (1989). “*Distributed Genetic Algorithms.*” Proc. Of 3rd Int. conf. on Genetic Algorithms (ed. Schaffer, J. D.), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.
- Takahama, T., Sakai, S., Ichimura, T., Isomichi, Y. (2004). “*Structural Optimization by Genetic Algorithm With Degeneration (GA^d)*”. Wiley Periodicals, Inc. Syst Comp Jpn, 35(5):32-43.
- Versteeg, H. K. e Malalasekera, W.(2007). “*An Introduction to Computer Fluid Dynamics.*” Pearson Education Limited 1995, 2007.

Anexos

Programa em Fortran com Instruções MPI para Computação Paralela

```

c-----
c
c   Programa que executa o ANSYS em varias maquinas em paralelo
c
c   Utilização: mpiexec -hosts N host1 M1 host2 M2 ... ansys_paralelo.exe
c
c   N - Numero de maquinas
c   M1, M2, ..., MN - Numero de processos em cada maquina
c
c   Este comando é executado pelo MATLAB dentro da função ansys_vec_p
c
c
c
c   program ansys_paralelo
c   USE DFPORT
c   IMPLICIT none
c   INCLUDE 'mpif.h'
c   INTEGER(4) RESULTADO
c   INTEGER MY_ID, ierr, IPROC, NPROC, NLAST, ND, NL,
+     I, J, K, NN, NC, INFO, status(MPI_STATUS_SIZE), K2, K1
c   DOUBLE PRECISION TT1, TT2, DADOS(320), RESULTADOS(128) ! NC<64
c   CHARACTER*256 MY_NAME, LIXO, COMANDO
c
c   CALL MPI_INIT(ierr)
c   CALL MPI_COMM_RANK(MPI_COMM_WORLD, MY_ID, ierr)
c   CALL MPI_COMM_SIZE(MPI_COMM_WORLD, NPROC, ierr)
c
c   NLAST = NPROC - 1
c   COMANDO='C:\Programas\ANSYS Inc\v110\ANSYS\bin\intel\ANSYS.exe"
+     -b -p ane3fl -i PIMSoptimizacao3.txt
+     -o PIMSoptimizacao3.out'
c   TT1 = MPI_WTIME()
c
c   Escreve no monitor o cabecalho
c
c   IF (MY_ID .EQ. 0) THEN
c     CALL MPI_GET_PROCESSOR_NAME(MY_NAME, ierr, INFO)
c     PRINT*, 'ansys_paralelo.exe'
c     PRINT*, '=====
c     PRINT*, 'Numero de processos iniciados: ', NPROC
c     PRINT*, '    O processo principal e: ID =', MY_ID, ' em ',
+       MY_NAME(1:13)
c   ENDIF
c-----
c
c   Processo principal
c
c   IF (MY_ID .EQ. 0) THEN
c
c     RESULTADO= SYSTEM('DEL resultados_p.txt')
c
c   Le o ficheiro 'variaveis_p.txt' com os dados (numero de cromossomas
c   e dados para cada cromossoma) vindo do MATLAB
c
c
c     OPEN (UNIT=10, FILE='variaveis_p.txt', IOSTAT=IERR, STATUS='OLD')
c     READ (10, *) NC
c     write(*, *) 'NC= ', NC
c     DO I = 1, NC ! Numero de Cromossomas
c       DO J = 1, 5 ! Sao 5 valores diferentes para cada Cromossoma
c         READ(10, *) DADOS(5*(I-1)+J)
c       ENDDO
c     ENDDO
c     CLOSE (10)
c   do I=1,32

```

```

c      write(*,*)DADOS(I)
c      enddo
c
c      Calcula o numero de Cromossomas por processo, ND,
c      o numero de Cromossomas do ultimo processo, NL e
c      envia esses valores a todos os processos auxiliares
c
c      ND = NC / NPROC
c      NL = NC - ND*(NPROC-1)
c      IF (NL .EQ. 0) NL= ND
c      write(*,*) 'ND= ',ND
c      write(*,*) 'NL= ',NL
c
c      Os primeiros processos recebem o mesmo numero de cromossomas, ND
c
c      DO IPROC = 1,NPROC-2      ! O numero de vectores enviados e NPROC-2
c      call MPI_SEND(ND, 1, MPI_INTEGER, IPROC,
+      1, MPI_COMM_WORLD, ierr)
c      ENDDO
c
c      O ultimo processo pode receber um numero diferente de cromossomas, NL
c
c      IF (NPROC .GT. 1) THEN
c      call MPI_SEND(NL, 1, MPI_INTEGER, NPROC-1,
+      1, MPI_COMM_WORLD, ierr)
c      ENDIF
c
c      Envia uma parte do vector de DADOS para os outros processos
c
c      DO IPROC = 1,NPROC-2      ! O numero de vectores enviados e NPROC-2
c      K1 = (IPROC*ND)*5+1
c      call MPI_SEND(DADOS(K1), ND*5, MPI_DOUBLE_PRECISION, IPROC,
+      1, MPI_COMM_WORLD, ierr)
c      ENDDO
c      IF (NPROC .GT. 1) THEN
c      K1 = ((NPROC-1)*ND)*5+1
c      call MPI_SEND(DADOS(K1), NL*5, MPI_DOUBLE_PRECISION, NPROC-1,
+      1, MPI_COMM_WORLD, ierr)
c      ENDIF
c
c      O processo principal executa um ciclo em que, para cada
c      cromossoma, escreve o ficheiro 'variaveis.txt', executa o
c      ANSYS e le o ficheiro 'resultados.txt'
c
c      DO I= 1,ND
c
c      escreve os dados no ficheiro
c
c      RESULTADO= SYSTEM('DEL variaveis.txt')
c      OPEN (UNIT=11,FILE='variaveis.txt',IOSTAT=IERR,STATUS='NEW')
c      WRITE(11,111) DADOS(5*(I-1)+1)
c      WRITE(11,112) DADOS(5*(I-1)+2)
c      WRITE(11,113) DADOS(5*(I-1)+3)
c      WRITE(11,114) DADOS(5*(I-1)+4)
c      WRITE(11,115) DADOS(5*(I-1)+5)
111  FORMAT( 'TEMP= ',E15.6 )
112  FORMAT( 'CONVE= ',E15.6 )
113  FORMAT( 'DBCC= ',E15.6 )
114  FORMAT( 'DBCC2= ',E15.6 )
115  FORMAT( 'YCS106= ',E15.6 )
c      CLOSE (11)
c
c      executa o programa ANSYS
c
c      RESULTADO= SYSTEM(COMANDO)
c
c      le o ficheiro de resultados
c
c      OPEN (UNIT=12,FILE='resultados.txt',IOSTAT=IERR,STATUS='OLD')
c      READ(12,*) LIXO
c      READ(12,*) RESULTADOS((I-1)*2+1)      ! Volume

```

```

        READ(12,*) LIXO
        READ(12,*) RESULTADOS((I-1)*2+2)    ! Tensao
c      write(*,*) 'Desloc= ',RESULTADOS((I-1)*2+1)
c      write(*,*) 'Tensao= ',RESULTADOS((I-1)*2+2)
        CLOSE (12)
        ENDDO

c
c      Recebe dos outros processos os restantes resultados
c
        DO IPROC = 1,NPROC-2          ! O numero de vectores recebidos e NPROC-2
            K1 = (IPROC*ND)*2+1
            call MPI_RECV(RESULTADOS(K1), ND*2, MPI_DOUBLE_PRECISION,
+              IPROC, 1, MPI_COMM_WORLD, status, ierr)
        ENDDO
        IF (NPROC .GT. 1) THEN
            K1 = ((NPROC-1)*ND)*2+1
            call MPI_RECV(RESULTADOS(K1), ND*2, MPI_DOUBLE_PRECISION,
+              NPROC-1, 1, MPI_COMM_WORLD, status, ierr)
        ENDIF

c
c      Escreve o ficheiro 'resultados_p.txt' para o MATLAB
c
        OPEN (UNIT=13,FILE='resultados_p.txt',IOSTAT=IERR,STATUS='NEW')
        DO I = 1,NC
            WRITE(13,*) 'Desloc'
            WRITE(13,*) RESULTADOS((I-1)*2+1)
            WRITE(13,*) 'Tensao'
            WRITE(13,*) RESULTADOS((I-1)*2+2)
        ENDDO
        CLOSE (13)

        ENDIF
c-----
c
c      Processos auxiliares
c
        IF (MY_ID .NE. 0) THEN
            CALL MPI_GET_PROCESSOR_NAME(my_name,ierr,INFO)
            PRINT*, '          e o processo: ID =',MY_ID,' em ',
+              MY_NAME(1:13)
c
c      Recebe o numero de Cromossomas que vai ter de calcular
c
            call MPI_RECV(ND, 1, MPI_INTEGER, 0,
+              1, MPI_COMM_WORLD, status, ierr)
            WRITE(*,*)'ND= ',ND
c
c      Recebe uma parte do vector de DADOS
c
            call MPI_RECV(DADOS, ND*5, MPI_DOUBLE_PRECISION, 0,
+              1, MPI_COMM_WORLD, status, ierr)
c
c      Cada processo auxiliar tambem executa um ciclo em que,
c      para cada cromossoma, escreve o ficheiro 'seccoes.txt',
c      executa o ANSYS e le o ficheiro 'resultados.txt'
c
            DO I= 1,ND
c
c              escreve os dados no ficheiro
c
                RESULTADO= SYSTEM('DEL variaveis.txt')
                OPEN (UNIT=11,FILE='variaveis.txt',IOSTAT=IERR,STATUS='NEW')
                WRITE(11,*) 'TEMP= ',DADOS(5*(I-1)+1)
                WRITE(11,*) 'CONVE= ',DADOS(5*(I-1)+2)
                WRITE(11,*) 'DBCC= ',DADOS(5*(I-1)+3)
                WRITE(11,*) 'DBCC2= ',DADOS(5*(I-1)+4)
                WRITE(11,*) 'YCS106= ',DADOS(5*(I-1)+5)
                CLOSE (11)
c
c              executa o programa ANSYS
c

```



```
RESULTADO= SYSTEM(COMANDO)
c
c      le o ficheiro de resultados
c
      OPEN (UNIT=12,FILE='resultados.txt',IOSTAT=IERR,STATUS='OLD')
      READ(12,*) LIXO
      READ(12,*) RESULTADOS((I-1)*2+1)    ! Volume
      READ(12,*) LIXO
      READ(12,*) RESULTADOS((I-1)*2+2)    ! Tensao
c      write(*,*) 'Desloc= ',RESULTADOS((I-1)*2+1)
c      write(*,*) 'Tensao= ',RESULTADOS((I-1)*2+2)
      CLOSE (12)
c
      ENDDO
c
c      Envia ao processo principal os resultados calculados
c
      call MPI_SEND(RESULTADOS, ND*2, MPI_DOUBLE_PRECISION, 0,
+                  1, MPI_COMM_WORLD, ierr)
c
      ENDIF
c-----
      CALL MPI_FINALIZE(ierr)
      STOP
      END
```

FUNÇÃO *ansys_vec_p.m*

```

% Função ansys vectorizada para processamento paralelo
%
% Aceita um vector de cromossomas correspondente a todos os
% indivíduos da população e em seguida escreve o ficheiro
% variaveis_p.txt com as variaveis associadas a todos esses
% indivíduos e le o ficheiro resultados_p.txt com o
% respectivo mérito.
%
% Tese de mestrado de Ricardo Amaral (Setembro/2008)
%
function [y]=ansys_vec_p(x)
% usar para teste x=[ ... ]
x=[ 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ;
    0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 ;
    1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 ;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 ];
%
caminhoMatlab='D:\Programas\MATLAB\r2007b\work\optimizacao';
%
% escreve o ficheiro de dados para ansys_paralelo.exe
%
[nlinhas,ncolunas]= size(x);
display(nlinhas);display(ncolunas);
y=zeros(nlinhas,1);
nome='\\variaveis_p.txt';
ficheiro=[caminhoMatlab,nome];
% display(ficheiro);
fid= fopen(ficheiro,'w');
fprintf(fid,'%d\n',nlinhas);
%
% Tmax e Tmin são os valores máximo e mínimos da temperatura respectivamente
Tmax = 24;
Tmin = 14;
%
% T é o dominio de valores reais da temperatura
T = [Tmin,Tmax];
%
% Tmax e Tmin são os valores máximo e mínimos da convecção respectivamente
Cmax = 8000;
Cmin = 5000;
%
% C é o dominio de valores reais da conveccao
C = [Cmin,Cmax];
%
% DSmax e min é a distancia entre o canal de arrefecimento e as coupling
% slots
DSmax = 0.007;
DSmin = 0.004;
%
% DS é o dominio de valores reais
DS = [DSmin,DSmax];
%
% DHmax e DHmin são os valores máximos e mínimos da distancia horizontal
% entre os dois "V" dos canais de arrefecimento
DHmax = 0.007;
DHmin = 0.004;
D = [DHmin,DHmax];
%
% DVmax e DVmin correspondem os valores máximo e mínimo da coordenada Y do sistema
% de coordenadas local 106 e que determinam a distancia vertical entre os
% canais e o centro da peça
DVmax = 0.130;
DVmin = 0.124;
%
% DV é o dominio de valores reais
DV = [DVmin,DVmax];
%
for k= 1:nlinhas

```

```
%
% Zt e Zc transformam o código binário em números reais positivos
% Os primeiros 7 genes pertencem à temperatura
Zt = x(k,1)*64 + x(k,2)*32 + x(k,3)*16 + x(k,4)*8 + x(k,5)*4 + x(k,6)*2 +
x(k,7);
% Os 5 genes seguintes pertencem à convecção
Zc = x(k,8)*16 + x(k,9)*8 + x(k,10)*4 + x(k,11)*2 + x(k,12);
% Os 4 genes seguintes pertencem a DS
Zds = x(k,13)*8 + x(k,14)*4 + x(k,15)*2 + x(k,16);
% Os 4 genes seguintes pertencem a DH
Zdh = x(k,17)*8 + x(k,18)*4 + x(k,19)*2 + x(k,20);
% Os 5 genes seguintes pertencem a DV
Zdv = x(k,21)*16 + x(k,22)*8 + x(k,23)*4 + x(k,24)*2 + x(k,25);
% Vamos transformar os valores reais positivos de Zt e Zc no respectivo
% valor da variável de projecto
TEMP = Tmin + ((Tmax-Tmin)/(2^7-1))*Zt;
CONV = Cmin + ((Cmax-Cmin)/(2^5-1))*Zc;
DS = DSmin + ((DSmax-DSmin)/(2^4-1))*Zds;
DH = DHmin + ((DHmax-DHmin)/(2^4-1))*Zdh;
DV = DVmin + ((DVmax-DVmin)/(2^5-1))*Zdv;
%
% Escreve no ficheiro variaveis_p.txt os valores da temperatura e da
% convecção a serem aplicados pelo Ansys para este elemento da
% população
%
fprintf(fid, '%e\n%e\n%e\n%e\n%e\n', TEMP, CONV, DS, DH, DV);
end % k=1:nlinhas
fclose(fid);
%
% Executa o programa ansys_paralelo.exe
!mpexec -hosts 2 labmest-1 1 labmest-0 1 ansys_paralelo.exe
display('executou ansys_paralelo');
%
% Le o ficheiro de resultados
nome='resultados_p.txt';
ficheiro=[caminhoMatlab,nome];
display(ficheiro);
fid= fopen(ficheiro,'r');
for k= 1:nlinhas
    lixo= fscanf(fid,'%s',1);
    deslocamento= fscanf(fid,'%e',1);
    lixo= fscanf(fid,'%s',1);
    tensao= fscanf(fid,'%e',1);
    fprintf('deslocamento= %f\ntensao= %f\n',deslocamento,tensao);
    %
    % Calcula a função de mérito a partir do volume e dos constrangimentos
    if deslocamento < 0.000050
        g= 0;
    else
        g= deslocamento - 0.000050
    end
    %
    % Funcao objectivo penalizada
    %
    % A Constante tem de ser 'afinada' para cada problema
    %
    Constante= 2000000000000;
    %
    y(k)= tensao + Constante*g ;
    %
    if deslocamento < 0.000050
        fprintf('    obj= %f, tens= %f, d= %f\n',y(k),tensao,deslocamento) ;
    else
        fprintf('**** obj= %f, tens= %f, d= %f\n',y(k),tensao,deslocamento) ;
    end
end % k=1:nlinhas
fclose(fid);
display(y);
%
```